SCIENCES ET AVENIR
sciencesetavenir.fr

© ALAMY/ PHOTO12 - CESARE ABBATO

SPÉCIAL POMPÉI

LES DERNIÈRES DÉCOUVERTES p.50

Dans le secret de LA MATIÈRE

Les nouveaux bosons de Higgs
L'énigmatique 5e force p.32

AVRIL 2020 - N° 878 ALLEMAGNE 6.80 €/ AUTRICHE 5.80 € / BELGIQUE 5.20 € / GRÈCE 5.20 € / ESPAGNE 5.20 € / ITALIE 5.20 € / DOM 5.20 € / ANDORRE 4,90 € / LUXEMBOURG 5.20 € / PORTUGAL 5.20 € / TOM 730 XPF/ TOM (AVION) 1400 XPF / SUISSE 8.80 CHF / TUNISIE 7.90 TND / MAROC 50 DH / CANADA-USA 7.50 $

LES RÉPONSES AU CORONAVIRUS

• Les traitements • Le vaccin p.66

M 02667 - 878S - F: 4,80 € - RD

mgen

GROUPE VYV

MA SANTÉ, C'EST SÉRIEUX.

J'AI CHOISI MGEN

MUTUELLE SANTÉ - PRÉVOYANCE

Martin Fourcade et 4 millions de personnes ont choisi MGEN pour ses valeurs solidaires, son authenticité mutualiste, l'accès aux soins de qualité et sa conception innovante de la protection qui intègre la prévoyance.

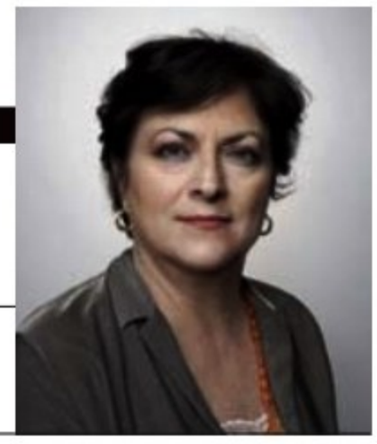
www.antigel.agency - Janvier 2019 - © Hervé THOUROUDE - Ce document est non contractuel

MARTIN FOURCADE
CHAMPION DU MONDE &
CHAMPION OLYMPIQUE
DE BIATHLON

MGEN, Mutuelle Générale de l'Éducation Nationale, n°775 685 399, MGEN Vie, n°441 922 002, MGEN Filia, n°440 363 588, mutuelles soumises aux dispositions du livre II du code de la Mutualité - MGEN Action sanitaire et sociale, n°441 921 913, MGEN Centres de santé, n°477 901 714, mutuelles soumises aux dispositions du livre III du code de la Mutualité.

ÉDITO

Dominique Leglu
Directrice de la rédaction



BERNARD MARTINEZ

À l'heure du grand confinement

Dix-sept mars 2020, une date qui restera dans nos mémoires. Celle du grand confinement. À l'heure qu'il est, fidèles lectrices et lecteurs, vous devez être, vous aussi, assigné.e.s à résidence. Toute l'équipe de *Sciences et Avenir*, qui œuvre désormais pour vous en télétravail, vous souhaite de garder la santé et... le moral ! Notre magazine, qui l'avait abordé dès le mois dernier, ne pouvait pas ne pas revenir sur le sujet majeur de cette crise mondiale qu'est devenue la pandémie de Covid-19. Pas question pour notre magazine mensuel, mis sous presse il y a deux semaines de faire la compétition avec les annonces quotidiennes. Pour l'information au jour le jour, c'est sur le site de *Sciences et Avenir** qu'il faut se rendre, où l'on retrouve de très nombreux articles scientifiques et médicaux ou des conseils pratiques. Dans nos pages, sont aussi explicitées les avancées les plus attendues, celles relatives aux traitements *(p. 68)* permettant de combattre directement et le plus rapidement possible le coronavirus Sras-CoV-2. Ou encore, est examinée la possibilité d'un vaccin, cette fois à plus long terme, vu les précautions à prendre lors d'essais cliniques longs et coûteux *(p. 69)*. Comme dans toute guerre, fût-elle sanitaire, il faut avoir observé puis analysé les caractéristiques de l'ennemi. Pour ensuite choisir les meilleures armes, celles qui viseront ses faiblesses. Les journalistes Hugo Jalinière et Hervé Ratel ont conçu une infographie, rappelant comment le virus utilise à son profit nos cellules humaines et sont revenus sur le phénomène d'infection. Chaque jour permet aux biologistes et généticiens d'affiner leurs connaissances et nous reviendrons sur cette pandémie dans notre numéro daté de mai. Lui aussi sera conçu, nous l'imaginons, par une équipe toujours confinée, faisant appel aux solutions qu'offre Internet pour dialoguer dans le travail et aussi, tout comme ses lectrices et lecteurs, pour rester en contact avec la famille et les amis. Le confinement, on l'aura compris, doit avoir des effets bénéfiques en « aplatissant la courbe » des cas de Covid-19, aplatissement indispensable pour que les hôpitaux ne soient pas submergés, mais il peut aussi engendrer des effets secondaires non négligeables, comme une certaine dépression. Pour la combattre, rien de mieux que de lire les pages dévolues aux derniers secrets de la matière. L'épopée remarquable de la physique de l'infiniment petit, lancée au XX^e^ siècle avec des accélérateurs de plus en plus puissants, se poursuit au XXI^e^ siècle. Les scientifiques sont en quête de particules inconnues. Afin, rien de moins, de décrire plus précisément le cosmos. C'est peu dire que la communauté des physiciens est en émoi. Comme le précise la journaliste Azar Khalatbari, *« le plus grand laboratoire de particules du monde, le Cern, joue son avenir »*. La crise, immense et douloureuse, ne doit pas abattre l'esprit humain et sa curiosité la plus fondamentale. ■

@dominiqueleglu

* sciav.fr/Covid19

SCIENCES ET AVENIR

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris - Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr - Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrice de la rédaction
Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
assistée de Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01

Rédacteur(trices) en chef
Carole CHATELAIN (mensuel) - 01.55.35.56.57
Vincent REA (hors-série) - 01.55.35.56.35
avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Olivier LASCAR (pôle digital) - 01.55.35.56.15

Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10

Rédacteur(trices) en chef adjoint(e)s
Andreina DE BEI (photo-iconographie) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (pôle digital) - 01.55.35.56.39
Mathieu NOWAK (actualités - rendez-vous) 01.55.35.56.38

Direction artistique
Thierry VERRET (conception)
Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59
Jean-Louis GILABERT (directeur artistique) - 01.55.35.56.28
Thalia STANLEY (directrice artistique adjointe) - 01.55.35.56.21

Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18

Chef(fe)s de service
Azar KHALATBARI (fondamental, sciences de la Terre) - 01.55.35.56.46
Rachel MULOT (enquêtes) - 01.55.35.56.07

Chef de service adjoint
Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45

Cheffe de rubrique
Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54

Rédaction
Bernadette ARNAUD grande reporteure (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.44
Franck DANINOS (fondamental) -
Arnaud DEVILLARD (numérique, data) - 01.55.35.56.27 -
Olivier HERTEL (technologie, futur) - 01.55.35.56.03
Hugo JALINIÈRE (médecine, biologie) - 01.55.35.56.52 - Sylvie ROUAT (espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Elena SENDER grande reporteure (biologie, neurosciences) - 01.55.35.56.43

Collaborateurs(trices)
Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN

Ont participé à ce numéro
Marine BENOIT, Héloïse CHAPUIS, Nicolas GUTIERREZ C., Pierre KALDY, Irène LACAMP, Coralie LEMKE, Étienne MORISSEAU, Muriel de VÉRICOURT

Secrétaire de rédaction
Frank MIETTON (1er secrétaire) - 01.55.35.56.17

Maquette Horia BAHRI - 01.55.35.56.19

Photo-iconographie
Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32

Pôle digital
Joël IGNASSE (rédacteur spécialisé) - 01.55.35.56.15
Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Camille GAUBERT (rédactrice santé) - 01.55.35.56.24
Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70

Documentation
Isabelle DO O'GOMES (cheffe de service) - 01.55.35.56.49
Astrid SAINT AUGUSTE - 01.55.35.56.48

Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr

Informatique
Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06

Comptabilité - Ressources humaines
Mélanie BENKHEDIMI - 01.55.35.56.14

Fabrication
Christophe PERRUSSON

Publicité
MediaObs. 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris
Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Courriel : l'initiale du prénom puis nom suivi de @mediaobs.com

Directrice générale :
Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70
assistée de Marie-Noëlle MAGGIE - 01.44.88.93.70

Abonnements et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir
4, rue de Mouchy 60438 Noailles cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (12 numéros) : 35 €. 1 an complet (12 numéros + 4 hors-séries) : 48 €.
Tarifs pays étrangers sur demande.

Abonnements Belgique : Partner Press, tél. : 00.32.2.556.41.40 – www.viapresse.be

Directeur de publicité :
Sylvain MORTREUIL - 01.44.88.97.75

Directrice de clientèle et responsable Web :
Karine GROSSMAN - 01.44.88.89.08

Assistante commerciale :
Séverine LECLERC - 01.44.88.97.57

Exécution : Cédric AUBRY - 01.44.88.89.05

Administration des ventes :
Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20

Directeur commercial : Valéry SOURIEAU

Partenariat: Joëlle HEZARD - 01.58.65.09.99

Directeur des abonnements
Luc BONARDI
Responsable des abonnements
Lina QUACH 01.55.35.56.63

Sciences et Avenir SAS
Président, Directeur de la publication : **Claude PERDRIEL**
Secrétaire général :
Jean-Claude ROSSIGNOL
Multimédia : Sciences et Avenir, 41 bis, avenue Bosquet, 75007 Paris.
Tél. : 01.55.35.56.00.

PEFC 10-31-3364
PEFC recyclé
Ce produit est issu de sources recyclées et contrôlées.
pefc-france.org

Origine du papier : Italie
Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,017 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Newsprint (Lieusaint), certifié PEFC

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comprend : un encart Paris Match et un encart Sophia Boutique jetés sur couverture en diffusion partielle des abonnés.
Commission paritaire n° 0620 K 79712. ISSN 00368636. Distribué par Presstalis.

Manchots papous, Malouines - Argentine

Phare des Éclaireurs - Canal de Beagle

Éclipse solaire

Photos de gauche à droite :

Jean-Pierre Luminet
Astrophysicien et écrivain

Pierre-Jean Furet
Historien

Renvoyez ce coupon à Croisières d'exception - 77 rue de Charonne - 75011 Paris

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

Code postal : ⌊_⌊_⌊_⌊_⌊_ Ville : .....

Tél. : ⌊_⌊_ ⌊_⌊_ ⌊_⌊_ ⌊_⌊_ ⌊_⌊_ E-mail : .....

Conformément à la loi "Informatique et Liberté" du 6 janvier 1978, nous vous informons que les renseignements ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande et que vous disposez d'un droit d'accès, de modification et de rectification des données vous concernant. *Si les conditions météorologiques le permettent. **Se référer à la brochure pour le détail des prestations et les conditions générales de vente. Les conférenciers sont présents sauf cas de force majeure. Licence n° IM075100063. Crédit photos : © Holland America Line, © Shutterstock et © Croisières d'exception. Création graphique : nuitdeplein.fr

CROISIÈRE

Éclipse solaire en Patagonie

Chili - Malouines - Uruguay - Argentine

Du 1er au 19 décembre 2020

Éclipse solaire le 14 décembre

Parc national Torres del Paine - Chili

Embarquez à bord du *Coral Princess* vers les terres mythiques de la **Patagonie**. Assistez au spectacle rare et magique de l'**éclipse solaire** prévue le 14 décembre* au large de l'Argentine qui vous sera commentée par **Jean-Pierre Luminet**, astrophysicien et émerveillez-vous devant la faune et les paysages splendides des pays traversés, de l'**Argentine** au **Chili** en passant par, les **îles Malouines**, **Ushuaia**, le **détroit de Magellan** et le **cap Horn**.

Possibilité d'effectuer un pré-séjour à l'Île de Pâques ou dans le désert d'Atacama.

Le *Coral Princess*

OFFRE SPÉCIALE **- 500 €/pers.** pour toute réservation avant le 30 avril 2020 (code REVE)

soit la croisière à partir de ~~5 490 €~~ **4 990 €/pers.****

au départ de Paris à bord du *Coral Princess*

* Vols depuis Paris, pension complète, boissons (sélection), conférences et taxes inclus. Départ de province possible : nous consulter.

Demandez la brochure au **01 75 77 87 48**, par e-mail à **contact@croisieres-exception.fr** ou sur **www.croisieres-exception.fr/brochures** (code **SAECL** à renseigner).

Croisières d'exception

S'enrichir de la beauté du monde

XPS

LA PERFECTION DANS CHAQUE DÉTAIL

Le nouveau XPS 13. Un touché exceptionnel grâce à son repose-poignets en fibre de verre, vous saurez qu'il est spécial dès le premier contact.

Dell.fr/XPS
En savoir plus gratuitement au 0801 800 001*

© 2020 Dell Inc. ou ses filiales. Tous droits réservés. Dell, EMC et d'autres marques sont des marques de Dell Inc. ou de ses filiales. Dell S.A, Capital 1 782 769 € Siège Social 1 rond-point Benjamin Franklin 34000 Montpellier. France. N° 351 528 229 RCS Montpellier –APE 4651Z. Photos non contractuelles. Dell n'est pas responsable des erreurs de typographie ou de photographie. *De 9h à 18h du lundi au vendredi (Numéro gratuit).

Windows 10

DELL

Vitesse, sécurité, durabilité et design remarquable: le tout avec Windows 10.

SOMMAIRE

Sciences et Avenir / N° 878 / avril 2020

CRISE COVID-19 P. 66

Les défis du coronavirus

La France, comme le reste du monde, doit faire face à la pandémie inédite de Covid-19, provoquée par un virus émergent. Le point sur les mesures prises pour tenter d'enrayer la propagation de la maladie et sur l'état de la recherche de traitements et de vaccins.

5 **Édito** par Dominique Leglu

9 **Courrier**

ÉVÉNEMENT

10 **Notre-Dame de Paris, un chantier multiforme**

SCIENCES FONDAMENTALES

16 **ACTUALITÉS** / Pourquoi la Voie lactée n'est pas plate / Les secrets de la bactérie ultrarapide / Une mini-Lune s'est invitée autour de la Terre

32 **Dossier : les derniers secrets de la matière**

42 **Le casse-tête des sursauts radio rapides**

46 **Mars dévoile ses entrailles**

49 **L'IA vient au secours des géologues**

HISTOIRE

18 **ACTUALITÉS** / Le tombeau de Toutankhamon n'aurait pas livré tous ses secrets / Des tatous géants surgissent de terre / Sur les traces de Romulus à Rome

50 **Les nouveaux trésors de Pompéi**

55 **Une forêt sous la mer**

56 **De possibles traces d'ADN de dinosaure**

NATURE

22 **ACTUALITÉS** / Des panneaux solaires au-dessus des vignes et vergers / Vol au travers d'un nuage de bulles / Les femelles wallabys passent leur vie à faire des petits

58 **Climat : la décennie cruciale**

62 **Deepwater Horizon : dix ans après, les leçons manquées de la catastrophe**

65 **Le premier animal qui n'a pas besoin d'oxygène**

Pour traquer les particules inconnues, les accélérateurs gagnent en puissance **p. 32**

À Pompéi, un nouveau secteur ouvert aux fouilles ne cesse de livrer des merveilles. **p. 50**

Les limites de la reconnaissance faciale **p. 86**

SANTÉ

28 **ACTUALITÉS** / Le bébé, un as de la reconnaissance faciale / Des électrodes pour prédire l'effet d'un médicament / Le stress nuit à l'immunité

74 **Nutrition : herbes et plantes aromatiques, des saveurs vitaminées**

76 **Portrait : Sophie Bensamoun, physicienne**

78 **Dossier spécial : protéger son audition**

HIGH-TECH

30 **ACTUALITÉS** / Le robot musicien Shimon va monter sur scène / Un capteur pour augmenter sa sensibilité / De l'humidité jaillit de l'électricité

86 **Les zones d'ombre de la reconnaissance faciale**

90 **En orbite dans un hôtel 5 étoiles**

92 **L'hydrogène vert a le vent en poupe**

95 **Un robot a appris tout seul à marcher**

96 **Comment ça marche : l'humain augmenté bombe le torse**

RENDEZ-VOUS

98 **Le ciel d'avril**

100 **Livres**

102 **Expositions**

103 **Questions de lecteurs**

104 **Décryptage : 2020 est-elle une année à tempêtes ?**

106 **L'info en continu sur sciencesetavenir.fr**

GETTY IMAGES - ALAMY/PHOTO12.COM - P. ZACHMANN/MAGNUM PHOTOS - J. BUGLEWICZ/THE NEW YORK TIMES/REDUX/ REA

Vous avez le sens de l'étiquette.

Chaussures détente
Cuir patiné
89€
Prix Unique

69€ la 2ème paire au choix

Bien sûr, vous avez bon goût. Le bon goût de ne jamais faire de faute de goût quelle que soit l'occasion. Et pour ne jamais commettre d'impair vous choisissez Bexley et ses modèles assurément dans les bons codes de l'élégance, de ce qui fait l'étiquette dans toutes sociétés. Mais là où vous excellez en matière de bon goût, c'est que vous avez l'intelligence de ne pas y laisser votre chemise, de mettre le bon prix, le prix de l'exigence, de l'excellence des matières, des savoir-faire français et c'est aussi ça, avoir le sens de l'étiquette.

Nos boutiques

Bexley.com

AIX-EN-PROVENCE I ANNECY I BORDEAUX I PARLY 2 - LE CHESNAY I LILLE I LYON 1ER I LYON 2ÈME I LYON 6ÈME I MARSEILLE I NANTES I NICE I PARIS 4ÈME - HENRI IV I PARIS 6ÈME - SAINT GERMAIN I PARIS 7ÈME - RASPAIL I PARIS 8ÈME - CHAUVEAU LAGARDE I PARIS 8ÈME - CHAMPS ÉLYSÉES I PARIS 8ÈME - LA BOÉTIE I PARIS 15ÈME - VAUGIRARD I PARIS 17ÈME - PALAIS DES CONGRÈS I PARIS - LA DEFENSE I TOULOUSE I BRUXELLES

COURRIER

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

« En quoi consiste la compensation carbone des compagnies aériennes? »
Sciences et Avenir n° 877, mars 2020

La lecture de l'article sur les compensations carbone dans l'aérien m'interpelle : si l'aviation est responsable d'environ 2 % des émissions de CO_2, qui ou quoi est responsable des autres 98 % et que font-ils pour réduire leurs propres émissions ? **Pierre Papucci**

S. et A. : La part du transport aérien est en effet de l'ordre de 2 à 3 %. Le problème, c'est que ce secteur est en très forte croissance et sa part devrait doubler d'ici à 2050 alors que le but est la fin des émissions de carbone à cette échéance. L'aérien doit donc agir au même titre que les 98 % restants. L'agriculture, les transports terrestres et maritimes, l'habitat, l'industrie doivent très nettement diminuer leurs émissions. Dans les transports, il s'agit de réduire les besoins de se déplacer et de passer à la motorisation électrique. Dans l'habitat et le tertiaire, il faut isoler les bâtiments et en finir avec les passoires thermiques. Dans l'industrie, il faut améliorer les *process* industriels, augmenter l'efficacité des machines, réduire les besoins en énergie, utiliser les énergies renouvelables. L'agriculture devra réduire engrais chimiques et pesticides et aller vers l'agroécologie.

Précision

Contrairement à ce que nous avons écrit dans notre article paru dans le n° 877, page 74, les chercheurs américains de l'université du Minnesota n'ont pas « révélé » la signification de la danse des abeilles *Apis mellifera,* ces figures qu'elles exécutent pour indiquer l'emplacement de la nourriture au reste de la ruche. Cette découverte est le fait de Karl von Frisch qui l'a présentée notamment dans *The danse language and orientation of bees* (1967). L'étude américaine a analysé cette danse dans une zone spécifique des États-Unis, ce qui a permis d'établir, comme nous l'indiquions, les espèces de fleurs privilégiées par les abeilles pour leur forte teneur en nectar et les périodes saisonnières les plus propices à cette recherche.

Erratum

Dans l'article du n° 877 consacré au cannabis médical, nous avons indiqué par erreur dans le sous-titre que 300 patients allaient suivre cette expérimentation alors qu'elle concernera bien 3000 personnes.

Une année au chevet d'un monument en péril

15 avril 2019 Un incendie détruit le toit, la charpente et la flèche de la cathédrale.

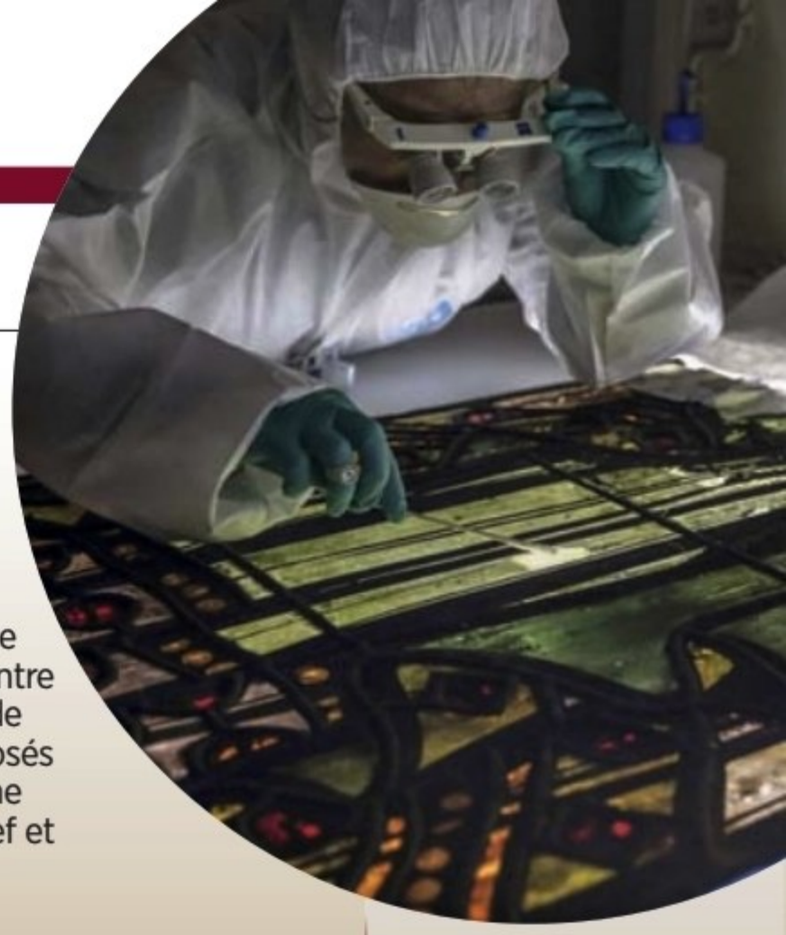
C. ENTZMANN/DIVERGENCE

16 avril Le président de la République Emmanuel Macron annonce que la restauration se fera en 5 ans.

20 avril Un relevé 3D complet de l'édifice endommagé est effectué.

M. KO LIAM YORK

Fin avril Des filets de protection contre les chutes de pierre sont posés et une bâche recouvre la nef et le chœur.



29 avril-15 mai 1000 m² de vitraux sont déposés.

Notre-Dame de Paris

Un chantier multiforme

Un an après l'incendie qui a ravagé le toit, la flèche et la charpente, le diagnostic de l'édifice, très fragilisé, est toujours en cours. Des experts en bois, pierre et autres matériaux, relevés 3D sont à l'œuvre pour recueillir des données et contribuer à la restauration.

Par Arnaud Devillard @A_Devila

VU DE SA FAÇADE OUEST, l'édifice situé dans l'île de la Cité, cœur historique de Paris, porte toujours beau avec sa rosace épargnée de 9,70 mètres et ses tours de 69 mètres. Mais l'absence de la flèche, les cintres soutenant les arcs-boutants et la présence d'une grue géante rappellent aux passants la fragilité de la cathédrale Notre-Dame de Paris. Un an après que les flammes ont emporté, dans la soirée du 15 avril, le toit et la charpente en chêne quasi-millénaire de ce monument classé au patrimoine mondial de l'Unesco, les origines de l'incendie sont toujours inconnues. Depuis, consolider la structure qui menace toujours de s'effondrer et choisir les options de restauration restent des priorités. Le montant exact des fonds recueillis par les organismes collecteurs (Fondation Notre-Dame, Fondation du patrimoine, Fondation de France, Centre des monuments nationaux et État) depuis avril 2019 — les chiffres cités variant de 80 millions à 930 millions d'euros — sera connu ce printemps. Voici cinq des grands défis qu'il reste à relever.

F. MORI/AFP/SIPA

Mai
Une horloge jumelle de celle de Notre-Dame de Paris disparue dans les flammes est découverte dans une remise de l'église de la Sainte-Trinité *(ci-dessous l'originale)*.

B. GRAY/AFP

Juillet Les arcs-boutants sont consolidés par des cintres en bois ; les travaux de sécurisation et de déblaiement sont suspendus pour cause de contamination au plomb.

Août Écoles et rues avoisinant la cathédrale ou le parvis sont soumises à une opération de décontamination ; les travaux reprennent ensuite.

Décembre
L'établissement public chargé de la conservation et de la restauration de la cathédrale, créé par décret, entre en fonction.

Février 2020
Début du démontage de l'échafaudage.

LEEMAGE

F. MORI/AFP/SIPA

Retirer l'échafaudage, un casse-tête de précision

Le toit de la cathédrale a été ravagé par les flammes alors que la flèche culminant à 95 mètres était ceinturée d'un échafaudage destiné à sa rénovation. La violence et la chaleur du feu ont distordu et soudé entre eux ces 500 000 tubes d'acier. Par chance, ce Meccano de 500 tonnes ne s'est pas disloqué lors de la chute de la flèche car il prenait appui sur la croisée de la nef et du transept, ce qui a sans doute permis d'éviter l'effondrement total de l'édifice. Aujourd'hui, le retrait de l'échafaudage est indispensable pour démarrer les travaux de réfection. L'opération a débuté en décembre 2019. Pour ce faire, la société Europe Échafaudage a commencé à poser un second échafaudage autour du premier afin de permettre que celui-ci soit découpé et déposé à l'aide d'une grue de 94 mètres. La fin des travaux est prévue en juin. Coût de l'opération : 2,15 millions d'euros.

L'état de la structure est en cours de diagnostic

Des filets de protection ont été fixés contre des chutes de pierre ; les vitraux de la nef et du chœur ont été déposés ; une bâche a été tendue à la place du toit ; les arcs-boutants ont été renforcés par des cintres en bois. Mais la cathédrale demeure très fragile pour deux raisons principales : l'exposition des pierres à des températures allant jusqu'à 800 °C et la perturbation de l'équilibre des forces en raison de la disparition de la pression verticale exercée par la charpente. Le Laboratoire de recherche des monuments historiques (LRMH) accompagne la maîtrise d'œuvre (l'architecte en chef des monuments historiques) dans le diagnostic du bâtiment et a établi, avec la Drac (Direction régionale des affaires culturelles) ▸

ALEXA DUFRAISSE

INTERVIEW

ALEXA DUFRAISSE

CHARGÉE DE RECHERCHE AU CNRS, COORDINATRICE DU PÔLE BOIS ET CHARPENTE POUR LE CHANTIER SCIENTIFIQUE

« Nos données scientifiques peuvent servir à la reconstruction »

Quelles questions intéressent le groupe de travail Bois et Charpente ?
Nous sommes une soixantaine de personnes, couvrant une quinzaine de champs disciplinaires. Il y a des archéologues, des historiens, des dendrochronologues, des mécaniciens du bois, des biochimistes, des charpentiers... L'enjeu est de tirer le parti scientifique le plus poussé possible de ces restes, sur l'histoire de la charpente, la manière dont elle a été faite, les réparations qu'elle a connues, mais aussi les outils utilisés, l'origine des charpentiers, comment ils s'intégraient sur le chantier à l'époque... D'où venaient les poutres également. Le bois d'un arbre enregistre le temps qui passe et les variations de son environnement : on peut en déduire son âge, la densité de peuplement des forêts, le climat...

Ces informations seront-elles aussi utiles à la reconstruction ?
Oui, surtout si celle-ci est décidée à l'identique. Elles permettront d'aller chercher des bois correspondant à ce que l'on aura compris de la charpente. Mais pour l'heure, le diagnostic de l'édifice est toujours en cours. Les chercheurs des groupes de travail Structure et Pierre y travaillent.

Avez-vous déjà mené des analyses sur les restes carbonisés ?
Nous n'y avons eu accès qu'à partir de février, en raison des retards dus aux procédures de formation au risque plomb Nous avons trié une partie des bois médiévaux effondrés dans la nef. Le relevé est toujours en cours (état, photogrammétrie, mesures, prélèvements). Actuellement, nous sommes à la recherche de financements pour justement pouvoir étudier ces bois sous toutes les coutures, dans le respect de la conservation de certains éléments patrimoniaux.

Propos recueillis par A. D.

d'Île-de-France, le protocole d'évaluation des vestiges. En 2019, sur un budget annuel de 850 000 euros, le LRMH en a affecté 60 000 à Notre-Dame de Paris. Le laboratoire étudie en outre l'humidité et le temps de séchage des pierres gorgées d'eau déversée par les pompiers. Un voûtain (partie de la voûte délimitée par arête et ogive) perd environ la moitié de son eau en cinq à six mois. Ensuite, le processus est plus lent. « *Pour l'heure, les trous dans les voûtes engendrent une ventilation qui évite un développement microbiologique*, explique Thierry Zimmer, directeur adjoint du LRMH. *Mais, même après la reconstruction, il faudra surveiller durant longtemps l'évolution intérieure de la cathédrale.* »
Les vestiges ont tous été photographiés, triés, conservés. Y compris la cendre et le plomb fondu, entreposés dans des sacs sous des tentes montées sur le parvis, avec les morceaux carbonisés de la charpente. « *Nous devons pouvoir dire à terme où telle ou telle pierre a été retrouvée de façon à pouvoir la modéliser et virtuellement la remonter. C'est ce que nous sommes en train de faire avec un laboratoire du CNRS* », poursuit l'expert. Les données amassées en vue du diagnostic feront l'objet d'un rapport en septembre prochain. Si le LRMH n'intervient pas dans les choix architecturaux futurs, ses analyses aideront à déterminer ce qu'il est possible ou non de faire. L'architecte en chef des monuments historiques n'exclut pas de réutiliser des éléments tombés lors du sinistre et le LRMH contribue à lui fournir des données sur leur état. « *La priorité est de refermer le toit. De toute façon, la restauration des voûtains, des façades et des vitraux ne sera pas conditionnée par le choix de la nature de la charpente* », note Thierry Zimmer.

PATRICK ZACHMANN/MAGNUM PHOTOS

Le numérique à la rescousse

Quatre jours après l'incendie, dans le cadre d'une procédure d'« urgence impérieuse », la société Art Graphique & Patrimoine (AGP) a réalisé un nuage de points de l'édifice au scanner laser 3D. Cette société spécialisée a pu collecter 30 à 40 milliards de points. « *Il n'y avait jamais eu de cartographie 3D de la cathédrale dans son intégralité (intérieur, extérieur, tous les locaux)* », précisait son fondateur Gaël Hamon à *Sciences et Avenir* en septembre 2019. La numérisation de l'historien de l'art Andrew Tallon était partielle car destinée à une étude historique et non technique. Ce nouveau travail sur l'état de l'édifice a guidé la mise en place des étais pour le consolider. Par ailleurs,

Les 500 000 tubes d'acier, composant l'échafaudage ceinturant la flèche, ont fondu sous la chaleur de l'incendie.

le Groupement des entreprises de restauration de monuments historiques a noué un partenariat avec l'éditeur californien de logiciels de conception 3D Autodesk pour créer un outil de « Building information management » (BIM) qui sera mis à disposition de tous les intervenants. « *Son but est de fournir un modèle préfigurant les tranches de travaux, le planning, les coûts et la répartition des missions, phase par phase*, poursuit l'expert. *Le BIM doit être fondé sur des données exactes pour pouvoir effectuer toutes les simulations nécessaires et évaluer la faisabilité des projets.* »

Décontaminer le site des particules de plomb

Les travaux dans l'enceinte de la cathédrale ont été suspendus en juillet 2019 jusqu'au 19 août. En cause, la contamination du site par les 300 à 400 tonnes de plomb de la toiture et de la flèche dispersées sous forme de poussières par l'incendie. Après avoir louvoyé, les autorités ont fermé les écoles avoisinantes puis le parvis, les rues et les ponts bordant la cathédrale. Plusieurs techniques de dépollution ont été mises en œuvre selon les cas (lavage haute pression, gels, retrait du macadam). L'inspection du travail a ensuite imposé des procédures destinées à protéger les ouvriers sur le chantier une fois celui-ci rouvert : pédiluves, douches, combinaisons jetables, sas, etc. Le CNRS a également dû former et équiper ses chercheurs travaillant sur le site. De son côté, le LRMH a évalué sur les vestiges diverses techniques et produits de nettoyage. « *Pour le bois et le métal, l'aspiration suffit* », note Thierry Zimmer.

Reconstruire la charpente

Les spécialistes insistent : il ne s'agit pas de « reconstruire » Notre-Dame de Paris mais de la « restaurer ». Sauf la charpente et la flèche, détruites. Les restes carbonisés sont, par définition, inutilisables sinon à des fins de recherche (*lire ci-dessus*). Pour l'heure, il n'y a pas de choix arrêté sur le matériau de la charpente de remplacement : bois, béton, métal ? Ni sur une réfection à l'identique. Même chose pour la flèche. Sur tous ces aspects, le consensus est loin d'être établi. Ni sur le délai de cinq ans de travaux annoncés par le président de la République. Mais là, l'objectif est impératif. ■

POUR EN SAVOIR PLUS

- **Notre-Dame de Paris en nuage de points :** sciav.fr/878sanner
- **Les enjeux de la charpente de la cathédrale :** sciav.fr/878charpente
- **Notre-Dame de Paris et la science :** sciav.fr/878NDPscience

RECHERCHE

Huit chantiers scientifiques en cours

Au lendemain de l'incendie, la communauté scientifique s'est vite organisée. Notre-Dame de Paris est une véritable banque de données pour les historiens, les archéologues mais aussi les spécialistes du bois, du climat, des sciences humaines. « *Si nous ne faisions rien, nous risquions de perdre ce potentiel informatif* », explique Martine Regert, directrice de recherche en archéologie biomoléculaire au CNRS. Depuis mai 2019, elle coordonne avec Philippe Dillmann, spécialiste en archéomatériaux du CNRS, un chantier scientifique associant le CNRS et le ministère de la Culture. Huit groupes de travail ont été constitués (verre, pierre, métal, bois-charpente, numérique, acoustique, structure, anthropologie). « *Toute la difficulté réside dans la synergie entre l'urgence du chantier et le long terme de la recherche.* » Ce qui n'empêche pas les chercheurs d'être à pied d'œuvre sur le site et d'assister tous les mois à des réunions de suivi avec la maîtrise d'œuvre et la maîtrise d'ouvrage. Certains ont reçu une formation de cordiste pour atteindre les hauteurs de la cathédrale. À noter : rien, dans les fonds gérés par l'établissement public chargé de la restauration, n'est prévu pour la recherche. Le CNRS a débloqué des crédits spécifiques pour lancer des projets. L'Agence nationale de la recherche financera ceux qu'elles aura sélectionnés.

Croisière Spitzberg

LES POINTS FORTS

- **Passage du cercle polaire arctique** avec remise de diplôme
- **Archipel des îles Lofoten** avec ses vestiges vikings et ses colonies d'oiseaux rares dont l'aigle de mer
- **Navigation dans la Baie de la Madeleine** au cœur des plus beaux glaciers et icebergs, paradis de la faune arctique
- **Cap Nord et soleil de minuit**
- **8 conférences d'experts** du Grand Nord
- **Croisière francophone :** Directeur de croisière, ateliers, conférences, excursions...
- **A la meilleure période** de l'année : juillet 2020

NAVIGUEZ A BORD DU LÉGENDAIRE

Récemment rénové, l'Astoria conserve tout **le charme des navires d'autrefois,** de ceux qui ont une âme. Cet élégant paquebot d'inspiration Art déco est **un navire à taille humaine,** qui offre de la **chaleur** et de la **convivialité.** Parfaitement adapté à la navigation de haute-mer, il est également **idéal pour naviguer dans les fjords** parmi les icebergs, et près des côtes **pour découvrir la faune polaire.**

VERS LE GRAND NORD NORVEGIEN

Pour pénétrer au cœur de l'océan Arctique…

Jusqu'à la baie de la Madeleine, point d'orgue de la croisière, le Spitzberg offre **une nature sauvage,** encore préservée, **d'une incroyable beauté** et d'une grande fragilité.

Sur la trace des baleiniers, **découvrez cette terre polaire** riche de glaciers qui se jettent dans l'océan et **sanctuaire mondial des ours polaires.** En plus des sommets enneigés d'un blanc immaculé, vous apprécierez les couleurs vives des maisons de Tromso et des **villages de pêcheurs des îles Lofoten** nichés au fond des **fjords de Norvège les plus grandioses** et, au cap Nord, **le mythique soleil de minuit.**

M/S ASTORIA

DEMANDE DE DOCUMENTATION **GRATUITE**

SANS ENGAGEMENT DE VOTRE PART

☑ **Je souhaite plus d'information sur les croisières SPITZBERG de Rivages du Monde**

- **Par courrier** à Rivages du Monde - 19 rue du 4 septembre - 75002 Paris
- **Par e-mail** à info@rivagesdumonde.fr **EN PRÉCISANT LE CODE AVANTAGE : SCAVE03**
- **Par téléphone** au 01 58 36 08 36 **EN PRÉCISANT LE CODE AVANTAGE : SCAVE03**

MES COORDONNÉES M. ☐ MME. ☐ **VOUS VOYAGEZ** EN COUPLE ☐ SEUL(E) ☐ ENTRE AMIS ☐

NOM PRÉNOM

ADRESSE

CODE POSTAL VILLE PAYS

COURRIEL TÉLÉPHONE

☐ J'accepte de recevoir des informations et offres commerciales de Rivages du Monde par voie electronique

Mentions CNIL : Ces informations sont enregistrées dans le fichier Rivages du Monde pour traiter votre demande de brochures et/ou votre commande. Conformément à la loi « Informatique et Libertés » du 6 /01/78 modifiée et au RGPD du 27/04/16, elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification à l'adresse suivante : Rivages du Monde 19 rue du Quatre-Septembre, 75002 Paris. Notre Politique de Confidentialité est disponible sur le site : www.rivagesdumonde.fr. Vos données postales sont susceptibles d'être transmises à nos partenaires commerciaux, si vous ne le souhaitez pas, cochez cette case ☐

SASU Rivages du Monde - RCS Paris B 438 679 664 - Immatriculation Atout France : IM075100099 - RCP Hiscox N° police : HARCP0087439 - Garantie financière : GROUPAMA-ASSURANCES CRÉDIT N° police : 4000713765/2. Immatriculé à l'ORIAS dans la catégorie Mandataire d'intermédiaire d'assurance (MIA) sous le N° 19003053 - www.orias.fr. Crédit photos Getty.

SCAVE03

Pourquoi la Voie lactée n'est pas plate

Une collision avec la galaxie naine du Sagittaire serait responsable de son aspect déformé.

Les données du satellite européen Gaia ont permis de reconstituer la forme de la Voie lactée, révélant sa légère distorsion

STEFAN PAYNE-WARDENAAR, ESA

ASTRONOMIE Le mystère ne cessait d'intriguer les astronomes : le disque de la Voie lactée, la région où résident la plupart de ses milliards d'étoiles, n'est pas tout à fait plat. Il a plutôt la forme d'une roue voilée. En mesurant la position et la vitesse de millions d'étoiles au sein de ce disque, le satellite Gaia de l'Agence spatiale européenne a permis à une équipe italo-germanique de constater que cette déformation n'est pas statique mais qu'elle change d'orientation au fil du temps en faisant le tour du centre galactique en 600 à 700 millions d'années. Une vitesse élevée qui invalide plusieurs scénarios imaginés pour expliquer la déformation du disque, notamment la présence d'un halo de matière noire. Désormais les astronomes impliquent une des galaxies satellites de la Voie lactée. La coupable présumée serait la galaxie naine du Sagittaire : elle a déjà percuté la Voie lactée dans le passé et serait en train de récidiver. Son impact produit des ondulations qui tordent le disque galactique, à la manière d'un caillou jeté dans l'eau qui forme des vaguelettes concentriques. **J. I.**

La recette des bulles de savon géantes

PHYSIQUE Le « truc » des artistes de rue qui forment des bulles de savon géantes a finalement été percé à jour par un physicien américain. Il a découvert que, outre l'eau, des détergents ou encore de l'alcool, la clé est d'ajouter des polymères tels la gomme de guar ou le polyéthylène glycol. Ces chaînes moléculaires s'emmêlent pour former un maillage extensible et résistant. En utilisant des polymères de différentes tailles, ce qui optimise encore l'élasticité des films, on peut créer des bulles de 100 mètres carrés ! **F. D.**

TORSTEN BLACKWOOD/ AF

Les polymères ajoutés à l'eau et aux détergents permettent de former un film savonneux plus résistant et élastique.

SOURCE : JUSTIN BURTON, UNIVERSITE EMORY, ÉTATS-UNIS.

500 millions

La distance en années-lumière de la première trace d'O_2 dans l'Univers

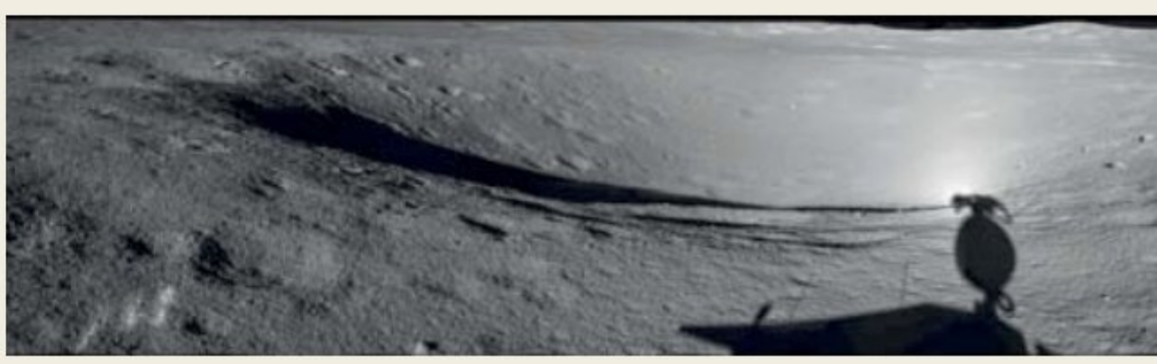
ASTROCHIMIE Pour la première fois, de l'oxygène moléculaire a été détecté ailleurs que dans notre galaxie. Il a été débusqué par des astronomes chinois dans la galaxie Markarian 231, au centre de laquelle dansent deux trous noirs très actifs. C'est à leur périphérie que le dioxygène a été repéré avec deux radiotélescopes. **J. I.**

SOURCE : JUNZHI WANG, SHANGHAI ASTRONOMICAL OBSERVATORY, CHINE.

La face cachée de la Lune trahit son passé

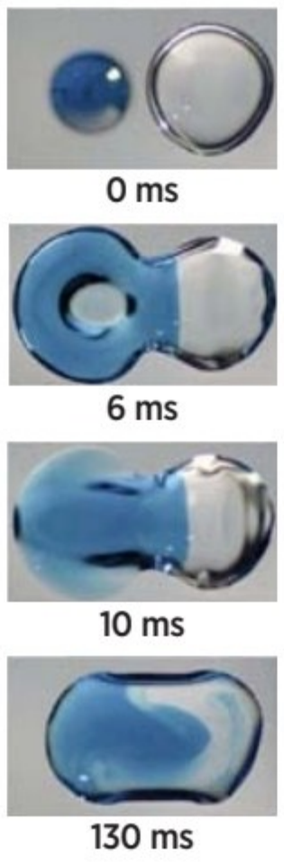
SÉLÉNOLOGIE Le sous-sol de la face cachée de la Lune est en grande partie constitué de matériaux granulaires hautement poreux, combinant des roches de différentes tailles. Voilà les enseignements préliminaires livrés par Yutu-2, de la mission chinoise Chang'e-4, premier rover de l'histoire à arpenter la face cachée de la Lune *(photo ci-contre)*. Sans doute le résultat d'un passé durant lequel notre satellite était frappé par de nombreux astéroïdes. **M. B.**

SOURCE : CHUNLAI LI, NATIONAL ASTRONOMICAL OBSERVATORIES, PÉKIN, CHINE.



La rencontre entre deux gouttelettes saisie sur le vif

MÉCANIQUE DES FLUIDES Des scientifiques de l'université d'Oxford (Royaume-Uni) ont filmé avec une caméra à 25 000 images par seconde la rencontre entre deux gouttelettes, dont l'une était colorée en bleu, pour bien saisir les interactions. Selon les expériences et la tension superficielle des fluides, les gouttelettes fusionnent ou se chevauchent sans jamais se mélanger. **H. C.**



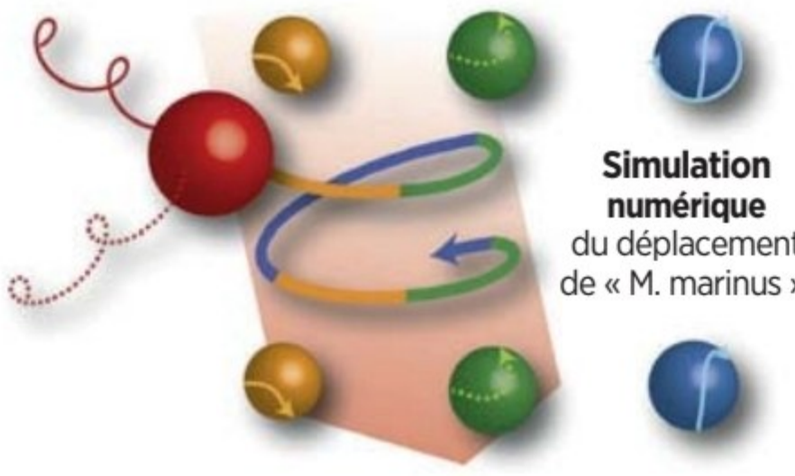
T. C. SYKES ET AL.

Les gouttes fusionnent sans se mélanger.

Les secrets de la bactérie ultrarapide

BIOLOGIE Un déplacement de 500 fois sa taille en une seconde : voilà l'exploit réalisé par la bactérie *Magnetococcus marinus*. Des simulations numériques menées à l'institut Max Planck (Allemagne) laissent à penser qu'elle y parvient en actionnant deux faisceaux de longs filaments hélicoïdaux, appelés flagelles, en un mouvement de rotation opposé. L'un « tire » ainsi la bactérie et l'autre la « pousse » **I. L.**

MAX PLANCK INSTITUTE



Simulation numérique du déplacement de « M. marinus ».

QUESTIONS À

François Colas

Astronome à l'Observatoire de Paris

Une mini-Lune s'est invitée autour de la Terre

Une « mini-Lune » orbitant autour de la Terre vient d'être identifiée. De quoi s'agit-il exactement ?
Elle a été repérée le 15 février par les télescopes du Catalina Sky Survey aux Etats-Unis. Dénommée « 2020 CD3 », cette mini-Lune gravite effectivement autour de notre planète, mais ses dimensions n'ont rien de comparable avec celles de notre fidèle compagnon céleste. Elle ne fait que quelques mètres de large, la taille d'une voiture. Les télescopes n'observent d'ailleurs qu'un tout petit point blanc. On ne sait rien de sa forme, de sa composition ou de sa couleur véritable. La lumière solaire qu'elle renvoie indique néanmoins qu'il s'agit d'un astéroïde et non d'un débris spatial.

À quelle distance se situe-t-elle ?
À environ un million de kilomètres de la Terre, soit près de trois fois la distance qui nous sépare de la Lune, sur une orbite de type ellipsoïdal et assez chaotique. L'astéroïde aurait été « capturé » par la Terre il y a environ trois ans, indiquent les calculs, moment où il devait voguer au voisinage de notr planète.

Existe-t-il un précédent ?
Oui. En 2006, le Catalina Sky Survey a repéré un corps rocheux en orbite autour de la Terre. Il n'y était resté qu'une petite année avant de disparaître.
Un sort équivalent attend 2020 CD3 : les influences gravitationnelles conjuguées de la Terre et de la Lune l'expulseront entre avril et mai. Il partira alors probablement vers l'intérieur du système solaire avant de tomber sur notre étoile.

Propos recueillis par F. D.

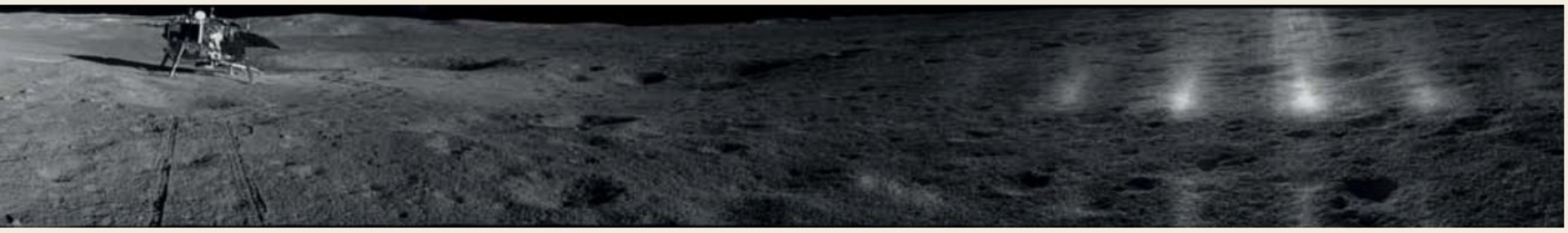
Le plus lointain objet visité se livre

ASTRONOMIE Survolé en janvier 2019 par la sonde New Horizons, l'astéroïde Arrokoth, situé à 6,5 milliards de kilomètres de la Terre, se dévoile peu à peu. De nouvelles données indiquent que ses deux lobes présentent la même couleur, la même composition et un âge identique d'au moins quatre milliards d'années. Ils se sont rapprochés l'un de l'autre à très faible vitesse — moins de 15 km/h ! — avant de fusionner. **F. D.**

SOURCE : W. B. MCKINNON, WASHINGTON UNIVERSITY IN ST. LOUIS, ÉTATS-UNIS.

NASA

L'astéroïde Arrokoth et ses deux lobes.



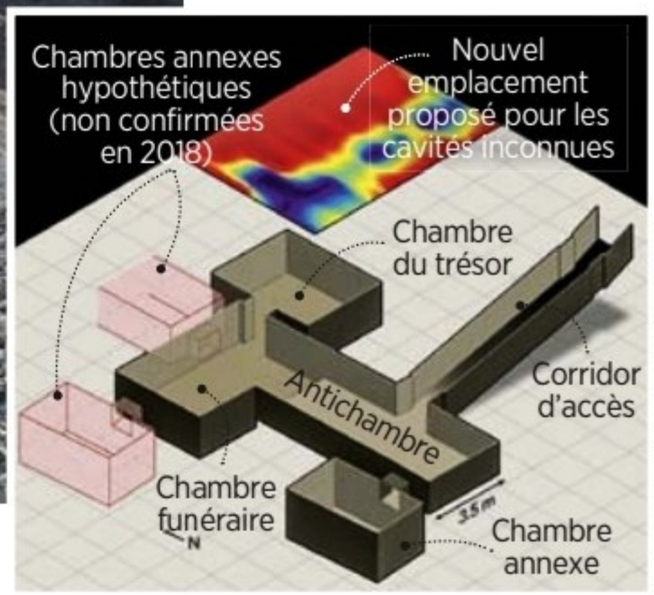
CNSA

L'extraordinaire efficacité des casques des poilus

ÉQUIPEMENT Le casque Adrian porté par les soldats français lors de la Première Guerre mondiale s'est montré plus efficace que celui utilisé aujourd'hui par l'armée américaine pour protéger des ondes de choc dues aux explosions. En menant des tests sur des mannequins, des ingénieurs américains ont montré que le casque français offrait une meilleure protection contre ce phénomène que celui des Britanniques ou des Allemands de l'époque. **A.-S. T.**

SOURCE : JOOST OP 'T EYNDE, DUKE UNIVERSITY, DURHAM, ÉTATS-UNIS.

La piste de l'existence de cavités secrètes dans le tombeau du pharaon vient d'être relancée (ici, l'entrée).



AGEFOTOSTOCK-NATURE - BRUNO BOURGEOIS

Le tombeau de Toutankhamon n'aurait pas livré tous ses secrets

De nouvelles analyses géoradars laissent à penser qu'une zone attenante à la chambre funéraire pourrait dissimuler un couloir inconnu.

ÉGYPTOLOGIE De récentes analyses géoradars relancent la piste de l'existence d'aménagements insoupçonnés à l'intérieur de la tombe de Toutankhamon (1332-1323 avant J.-C.), dans la Vallée des Rois, sur la rive occidentale du Nil, en face de Louxor (Égypte). Une zone attenante au tombeau royal recélerait d'importantes anomalies : « *Un espace de type couloir inconnu à quelques mètres de la chambre funéraire* », selon Mamdouh Eldamaty, l'ancien ministre des Antiquités égyptien, à la tête de ces travaux publiés dans la revue *Nature*. L'éventuelle présence de cavités secrètes dans le monument avait déjà défrayé la chronique entre 2015 et 2018. Les chercheurs espéraient alors découvrir un accès dissimulé pouvant conduire à une seconde chambre funéraire… celle de la reine Néfertiti ! Toutefois, les relevés géophysiques (par thermographie infrarouge, géoradar ou tomographie de la résistivité électrique) effectués par différentes équipes de chercheurs n'avaient pas donné de résultats concluants… **B. A.**

SKETCHFAB.COM

À VOIR SUR LE NET

1700 pièces de musées numérisées en accès libre

PATRIMOINE Si l'épidémie de Covid-19 a conduit à la fermeture d'un grand nombre de musées dans le monde, quelque 1700 modèles 3D numériques sont désormais téléchargeables librement sur Internet. On y trouve ainsi la sculpture de la tête d'Amenhotep III du Museum of Art de Cleveland (États-Unis) ou le yacht à vapeur *SY Carola* conservé au Scottish Maritime Museum d'Irvine (Écosse) *(photo)*. **A. D.** sciav.fr/878modeles

Des tatous géants surgissent de terre

PRÉHISTOIRE Quatre immenses carapaces fossilisées de tatous géants ont été mises au jour en Argentine, près de Buenos Aires. Elles appartiennent à une espèce *Glyptodon reticulatus* qui a occupé l'Amérique du Sud entre -30 millions d'années et -10 000 ans. Les fossiles se trouvaient enfouis dans l'ancien lit d'une rivière et ont été repérés par un paysan. D'après les premiers examens, les animaux devaient mesurer plus de 1,5 mètre et peser près d'une tonne ! **J. I.**

SOURCE : PABLO MESSINEO, INSTITUT INCUAPA – CONICET, OLAVARRÍA, ARGENTINE.

CEN/INCUAPA-CONICET

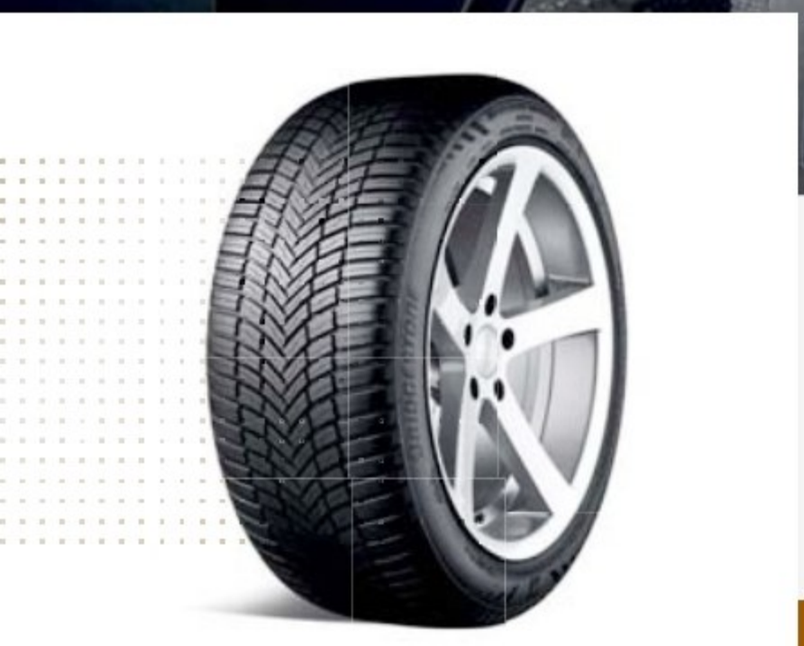
Les animaux devaient mesurer plus de 1,5 m et peser 1 tonne.

Une lignée fantôme tapie dans l'ADN moderne

PALÉOGÉNÉTIQUE Des chercheurs de l'université de Californie à Los Angeles (États-Unis) ont repéré des gènes inconnus chez des populations d'Afrique de l'Ouest. Pas moins de 2 à 19 % de leur patrimoine proviennent d'un ascendant qui ne correspond à aucun ancêtre connu, révèle l'analyse génétique. Il serait apparu il y a 650 000 ans et aurait croisé *Homo sapiens* il y 43 000 ans avant de disparaître. **C. L.**

BRIDGESTONE

MAÎTRISEZ VOTRE ROUTE, EN TOUTES SAISONS



WEATHER CONTROL A005

NOTE MAXIMALE EN ADHÉRENCE SUR CHAUSSÉE HUMIDE [1]

PERFORMANCE SUPÉRIEURE SUR LA NEIGE [2]

DURÉE DE VIE SUPÉRIEURE [3]

DISPONIBLE AVEC LA TECHNOLOGIE DRIVEGUARD RUN-FLAT (RFT) INTEGRÉE
SUR CERTAINES DIMENSIONS

1) Note de l'étiquetage européen « A », la plus haute note pour l'adhérence sur chaussée humide.
2) Certifié Montagne à 3 sommets avec flocon de neige (3PMSF)
3) Kilométrage garanti identique à nos pneus été premium

Bridgestone NV/SA Succursale France

Pour connaître le revendeur agréé Bridgestone le plus proche de chez vous, visitez notre site internet **www.bridgestone.fr**

Partenaire Olympique Mondial — BRIDGESTONE — Partenaire Paralympique Mondial

66 millions d'années

L'âge d'une tumeur osseuse

PRÉHISTOIRE C'est la plus ancienne trace d'histiocytose à cellules de Langerhans, une maladie orpheline connue pour provoquer chez l'humain des tumeurs osseuses. Elle a été découverte sur deux vertèbres fossiles d'un dinosaure à bec de canard (hadrosaure) mises au jour au Canada. Les lésions sont identiques à celles affectant les humains. **J. I.**

SOURCE : BRUCE M. ROTHSCHILD, INDIANA UNIVERSITY, MUNCIE, ÉTATS-UNIS.

La statue royale retrouve son bras

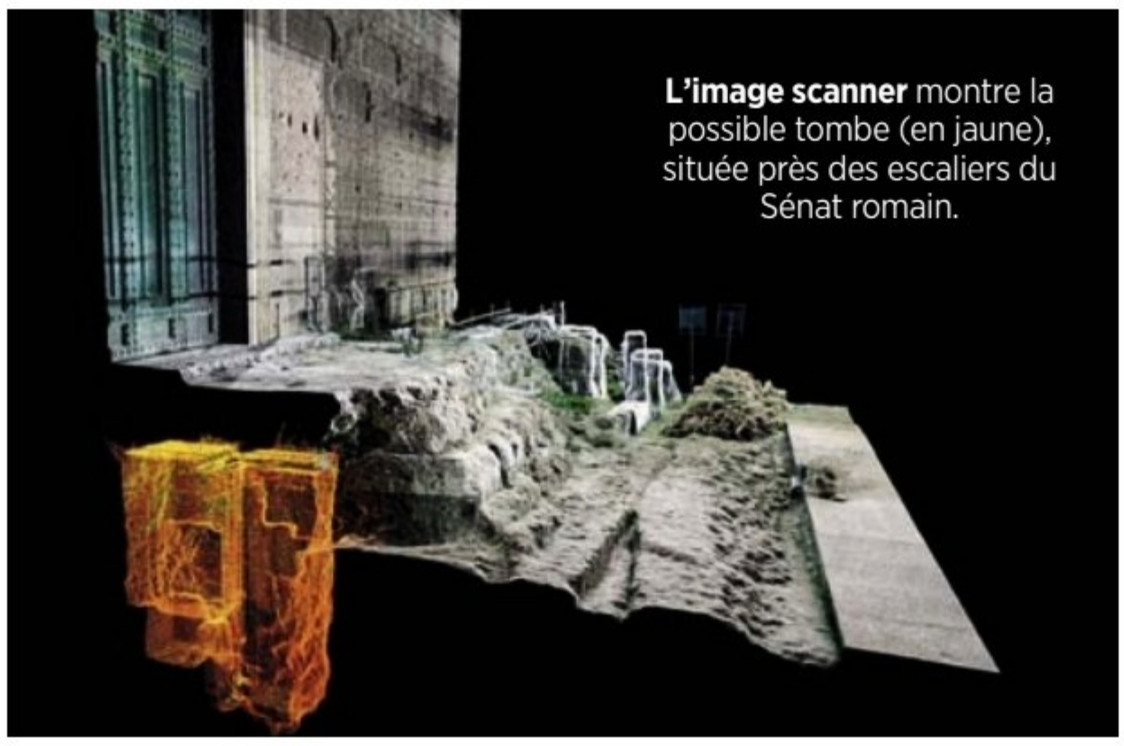
PATRIMOINE Une œuvre du site d'Angkor (Cambodge) vient d'être virtuellement reconstituée par la société française Iconem : la statue du souverain khmer Jayavarman VII (1180-1218). Un bras manquant avait été retrouvé par hasard en 2019 dans un centre de conservation archéologique. L'assemblage virtuel confirme qu'il appartient bien à la statue. **B. A.**

AUTORITÉ NATIONALE DE L'APSARA/ÉRIC BOURDONNEAU/ICONEM

La statue de Jayavarman VII (XIIIe siècle) reconstituée en 3D.

Sur les traces de Romulus à Rome

Un supposé tombeau qui pourrait être celui fondateur mythique de la cité a été découvert sur le Forum romain.



PARCO COLOSSEO

L'image scanner montre la possible tombe (en jaune), située près des escaliers du Sénat romain.

ANTIQUITÉ C'est une découverte qualifiée d'*« exceptionnelle »* par la direction du Parc archéologique du Colisée, à Rome (Italie), qui a été annoncée fin février : un « tombeau » creusé sur le Forum romain, pourrait être celui de Romulus. Il contient un sarcophage en tuf d'environ 1,40 m de long associé à un « autel » circulaire. L'hypogée, daté du VIe siècle avant J.-C., a été creusé à même la roche. Il se situe à quelques mètres à peine du Lapis niger, une stèle en tuf exhumée en 1899 portant des inscriptions latines parmi les plus anciennes connues, que les Romains associaient à Romulus, le fondateur légendaire de la ville.

Selon le mythe, la cité a été fondée par Romulus en 753 avant J.-C., après que celui-ci a tué son frère jumeau, Remus. Les archéologues estiment que seul un personnage d'exception a pu être honoré en ce lieu. D'après leurs dernières interprétations, plutôt que d'un tombeau, il pourrait s'agir d'un cénotaphe, un monument funéraire n'abritant pas de corps, construit à la mémoire de Romulus, ou encore un *hérôon*, édifice dédié à un héros. **B. A.**

LWL

L'arme avant (à gauche) et après restauration (à droite).

Le fabuleux poignard d'un légionnaire romain

Quoi. Un poignard romain vieux de 2000 ans retrouvé en 2019 dans un état de conservation inédit.

Où. Découvert sur le site de Haltern am See, un ancien camp romain situé près de Münster (Allemagne) lors d'une fouille menée en collaboration avec l'université de Trèves.

Qui. Ce serait l'arme d'un légionnaire ayant combattu les tribus germaniques sur le limes (frontière) de l'Empire romain.

Comment. La lame et sa poignée ciselée étaient décorées de feuillages en fils d'argent et laiton, et le fourreau incrusté d'émail et d'éclats de verre rouge. **B. A.**

Des empreintes de dinosaures sur le plafond d'une grotte

PRÉHISTOIRE Un mystère vieux d'un demi-siècle vient d'être résolu : les traces de dinosaure qui tapissent les parois et le plafond d'une grotte de Mount Morgan (Australie). Une nouvelle étude de photographies à haute résolution a permis de comprendre que la surface interne de la cavité formait autrefois la berge d'une rivière. Et les traces sont celles de deux ancêtres des *Tyrannosaurus rex* vivant il y a 200 millions d'années. **J. I.**

SOURCE : ANTHONY ROMILIO, UNIVERSITÉ DU QUEENSLAND, AUSTRALIE.

ANTHONY ROMILIO

Des photos datant de 1954 des traces fossiles et ce moulage d'empreinte ont été analysés.

Je suis le cassos' de service*

*À force d'entendre qu'on ne vaut rien, on finit par le croire.

À Apprentis d'Auteuil, nous voyons le meilleur en chacun des 30 000 jeunes (1) que nous accompagnons jour après jour dans nos 240 établissements. Aidez-les à construire leur avenir.

APPRENTIS D'AUTEUIL

LA CONFIANCE PEUT SAUVER L'AVENIR

FAITES UN DON sur www.apprentis-auteuil.org

(1) Selon le rapport d'activité Apprentis d'Auteuil 2019 (à venir).

Agence Marcel - © Aurélien Chauvaud.

Des panneaux solaires au-dessus des vignes et vergers

Outre la production d'électricité, ils protègent plantes et arbres fruitiers du gel et des canicules.

SUN'AGRI

Les « ombrières photovoltaïques » réduisent les besoins en eau des plantes.

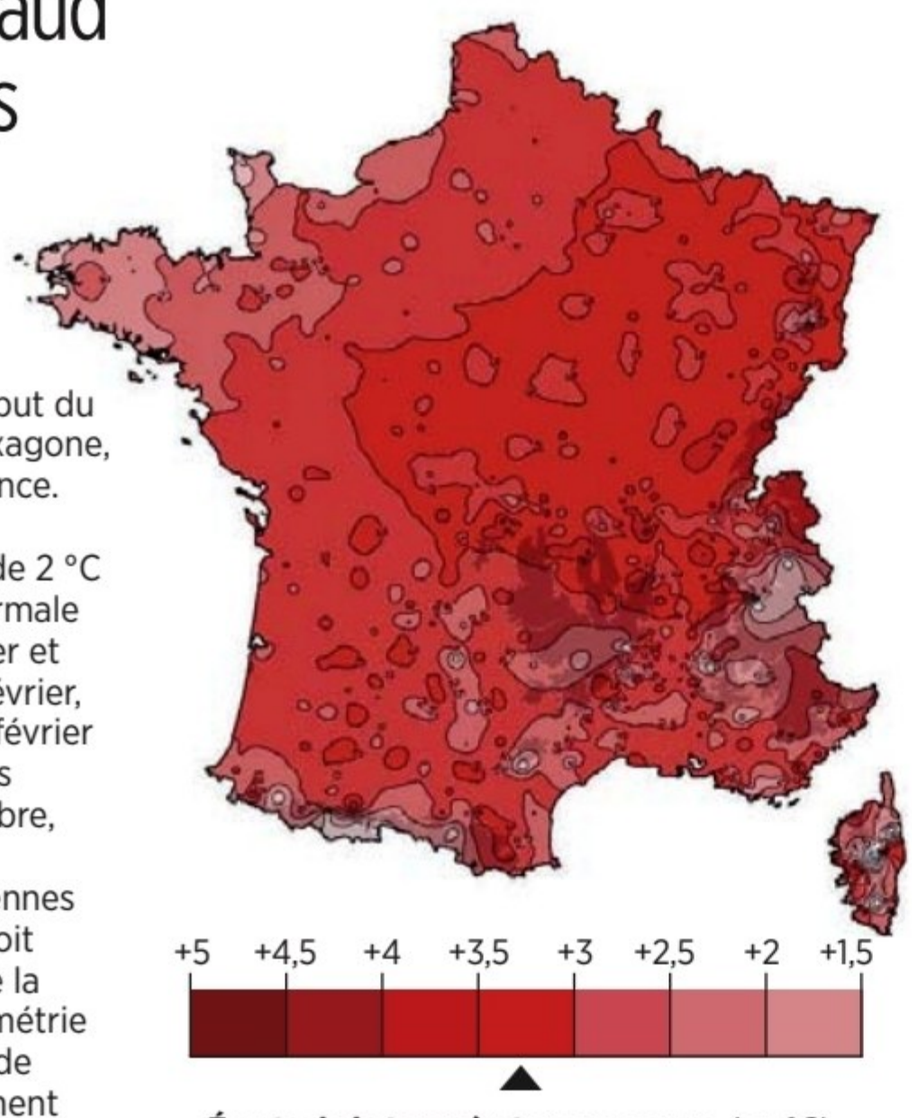
AGRONOMIE La station expérimentale fruits Rhône-Alpes (Sefra) devrait tester ce printemps sur 3 hectares des « ombrières photovoltaïques » pivotantes au-dessus d'abricotiers et de pêchers. La filière arboricole veut valider une technique développée depuis dix ans par l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae). Baptisée Sun'Agri, celle-ci consiste à protéger les arbres, mais aussi la vigne, à la fois de la canicule et du gel : des panneaux font de l'ombre quand les températures sont trop élevées et empêchent les sols de perdre leur chaleur quand il gèle. La production d'électricité n'est donc pas le but principal mais... une source de revenu complémentaire ! Les chercheurs ont développé des algorithmes qui reproduisent les besoins des plantes en eau, en chaleur et en ensoleillement pour optimiser le déploiement des panneaux mobiles placés 4,5 m au-dessus des plantes. Ils ont constaté que ces ombrières provoquaient une baisse des températures à la surface des feuilles de 4 °C et une diminution de 30 % des besoins en eau. **L. C.**

60 000 Le nombre de semences qui ont rejoint une réserve mondiale

BIODIVERSITÉ Ce nouvel arrivage porte à un million le nombre de variétés sauvages ou vivrières entreposées dans le Svalbard Global Seed Vault, la réserve mondiale de graines située sur l'île du Spitzberg (Norvège). Ce coffre-fort peut en abriter 4 millions. Le don a été effectué par 36 banques génétiques du monde entier pour protéger la diversité végétale des menaces, notamment climatiques. **S. R.**

Le plus chaud de tous les hivers

CLIMATOLOGIE L'hiver 2019-2020 a été le plus chaud depuis le début du XXe siècle dans l'Hexagone, annonce Météo France. Les températures moyennes ont été de 2 °C supérieures à la normale en décembre-janvier et même de 3 °C en février, deuxième mois de février le plus chaud jamais mesuré. Sur décembre, janvier, février, les températures moyennes ont été de 8,2 °C, soit 2,7 °C au-dessus de la normale. La pluviométrie a été excédentaire de 10 % et l'ensoleillement supérieur de 10 à 30 % sur une grande partie du pays *(lire aussi p. 104)*. **L. C.**



MÉTÉO FRANCE

Écarts de la température moyenne (en °C) constatés cet hiver par rapport à la normale (période de référence 1891-2010).

Une mangrove artificielle pour dessaliniser l'eau

HYDROLOGIE Des ingénieurs ont conçu un dispositif inspiré des palétuviers, arbres des mangroves dont les racines puisent l'eau de mer et la transforment en eau douce. Leur système, doté de membranes semi-perméables, imite le pompage capillaire des feuilles et le passage de l'eau dans les tiges en produisant une pression négative comme lorsque l'on boit avec une paille. L'eau serait ainsi non seulement débarrassée de son sel mais aussi des bulles qui pourraient être produites par le dispositif. **R. M.**

SOURCE : YUNKUN WANG, UNIVERSITÉ DU SHANDONG, JINAN, CHINE.

IL A DIT

« L'accord de Paris aurait dû être pris en compte par le ministre [des Transports] [...] et il aurait dû expliquer comment il le prenait en compte [dans le projet d'agrandissement de l'aéroport londonien de Heathrow], mais cela n'a pas été le cas »

Keith Lindblom, juge à la Cour d'appel de Londres (Royaume-Uni), qui a stoppé le projet d'extension par un arrêt du 27 février dernier

Parce que ce n'est pas toujours facile d'être un héros du quotidien

J'agis avec ENGIE

ENGIE récompense ceux qui consomment moins et vous donne le pouvoir d'agir.

Découvrez notre nouveau programme sur
monprogrammepouragir.fr*

ENGIE

L'énergie est notre avenir, économisons-la !

* « Mon programme pour agir » est un service gratuit réservé aux clients ENGIE ayant souscrit une offre de marché qui a pour objectif de valoriser les actions des consommateurs qui s'engagent en faveur de la transition énergétique. Grâce à leurs actions éco-responsables, ils peuvent cumuler des KiloActs et les utiliser pour accéder à des avantages et soutenir des projets.

ENGIE : SA AU CAPITAL DE 2 435 285 011 € - RCS NANTERRE 542 107 651. © Getty Images, Louise Carrasco.

Vol au travers d'un nuage de bulles

ORNITHOLOGIE Un vol au travers d'un nuage de minuscules bulles : voilà l'idée poursuivie par des chercheurs du Royal Veterinary College d'Hatfield (Royaume-Uni) pour mieux comprendre le déplacement des oiseaux. Des captures vidéo au ralenti et en haute définition du mouvement de quelque 20 000 bulles au passage des volatiles dévoilent la formation d'un vortex au niveau de la queue. Ce qui montre que celle-ci génère une portance au même titre que les ailes et une réduction de la résistance à l'air. **E. M.**

J.R. USHERWOOD

Les captures vidéo des oiseaux volant au travers de bulles ont permis d'identifier le rôle aérodynamique joué par la queue.

Les salades spatiales sont comestibles

AGRONOMIE **Les salades qu'ont fait pousser des astronautes dans la Station spatiale internationale (ISS) entre 2014 et 2016 sont bien comestibles. Des analyses conduites au sol sur des feuilles de ces laitues romaines rouges viennent de le confirmer. Les valeurs nutritives sont similaires à celles de légumes cultivés sur Terre et aucun micro-organisme pathogène ne s'y est développé.** **J. I.**

SOURCE : CHRISTINA KHODADAD, KENNEDY SPACE CENTER, MERRITT ISLAND (ÉTATS-UNIS)

Une forêt sous-marine préservée pendant 45 ans

Des concentrations d'algues brunes géantes observées à l'extrémité sud du continent américain ont conservé leur écosystème intact.

OCÉANOGRAPHIE C'est un jardin extraordinaire dans l'océan, où les oursins prolifèrent tant et si bien qu'ils transforment nombre de forêts sous-marines en « landes surpâturées », qu'ont découvert Alan Friedlander, de l'université de Hawaii (États-Unis) et ses collègues. À la pointe de l'Amérique du Sud, fouettée par l'Atlantique et le Pacifique, deux forêts d'algues brunes géantes (pour un total de 65 000 hectares) ont été retrouvées quasi inchangées, quarante-cinq ans après leur dernière observation scientifique en 1973. « *Dans les forêts de laminaires* Macrocystis pyrifera *de la Terre de Feu, l'abondance relative des algues, oursins et étoiles de mer n'a pas changé* », se réjouit le chercheur dans un article publié dans la revue *PLOS One*. Partout ailleurs dans le monde, les forêts d'algues, qui abritent des écosystèmes très riches, sont fragilisées par la surpêche et le changement climatique qui favorisent la pullulation de leurs brouteurs. Mais dans cette région peu accessible, les plongées observationnelles et les données satellitaires témoignent de la densité durable de la canopée et de l'abondance des poissons. **R. M.**

ENRIC SALA

65 000 hectares de laminaires en Terre de Feu (Argentine) ont conservé leur biodiversité.

VERNADSKY RESEARCH BASE

La couleur sang de la neige est due à une algue microscopique (ici près de la station ukrainienne Vernadsky.)

En Antarctique, la neige est rouge

NIVOLOGIE Il ne s'agit pas de sang : la mystérieuse couleur rouge de la neige autour de la station de recherche ukrainienne Vernadsky en Antarctique a trouvé une autre explication, après observation au microscope. Les responsables de cette coloration sont en réalité des microalgues unicellulaires connues sous le nom *Chlamydomonas nivalis*. Justement surnommées « sang des glaciers », car elles renferment un pigment rouge orangé. **A.-S. T.**

EN DEUX MOTS

PLAGES. Le changement climatique et la hausse du niveau des océans pourraient faire disparaître la moitié des plages de sable dans le monde d'ici à 2100 selon une étude de la Commission européenne. **AMENDE.** Des braconniers qui avaient pêché dans le parc national des Calanques, près de Marseille, ont été condamnés à payer 385 000 euros de dommages-intérêts. **SALMONELLES.** Les salmonelles et les intoxications associées seraient apparues avec l'agriculture, estime une équipe internationale après analyse de squelettes anciens.

LA FRANCE ET L'EUROPE À PORTÉE DE TRAIN.

SNCF

RENDEZ-VOUS SUR OUI.sncf, EN GARES, BOUTIQUES, AGENCES DE VOYAGES AGRÉÉES SNCF ET PAR TÉLÉPHONE.

Vente et information par téléphone au 3635 (service gratuit + prix appel). Offre valable uniquement sur les tarifs éligibles TGV INOUI. TGV INOUI est une marque déposée de SNCF Mobilités. Tous droits de reproduction réservés. SNCF Voyageurs, SA au capital social de 157 789 968 euros, inscrite au RCS de Bobigny sous le numéro 519 037 584 – 9, rue Jean-Philippe Rameau – 93200 Saint-Denis Cedex. #OSE-pub#

TGV inOui

VOYAGEZ AVEC VOTRE TEMPS

BIOSPHOTO

Pour la caouanne, les déchets de plastique ont une odeur de nourriture.

Les tortues marines sont victimes de leur odorat

HERPÉTOLOGIE C'est en raison de leur flair exceptionnel que les tortues marines (caouannes) gobent des sacs en plastique et non parce que les formes de ces derniers évoquent des méduses. Des expériences menées par l'université de Floride (États-Unis) ont révélé en effet que ces reptiles boudent les plastiques fraîchement jetés à l'océan alors qu'ils sont ensuite attirés par l'odeur ténue des micro-organismes qui s'accumulent sur les sacs. **R. M.**

SOURCE : JOSEPH. B. PFALLER, UNIVERSITÉ DE FLORIDE, ÉTATS-UNIS.

Les bourdons croisent leurs sens

ENTOMOLOGIE Les bourdons terrestres (*Bombus terrestris*) sont capables de reconnaître un objet rond ou cubique par le toucher dans l'obscurité, après l'avoir simplement observé au préalable à la lumière. C'est la première fois que cette faculté est démontrée chez un insecte. Ils ont aussi réussi l'expérience inverse : reconnaître un objet par sa forme à la lumière après l'avoir touché dans l'obscurité. **A.-S. T.**

C. SOLVI, QUEEN MARY UNIVERSITY OF LONDON, ROYAUME-UNI.

A. KOWALEWSKA AND J. BREBNER

L'insecte reconnaît l'objet en le touchant.

Les femelles wallabys passent leur vie à faire des petits

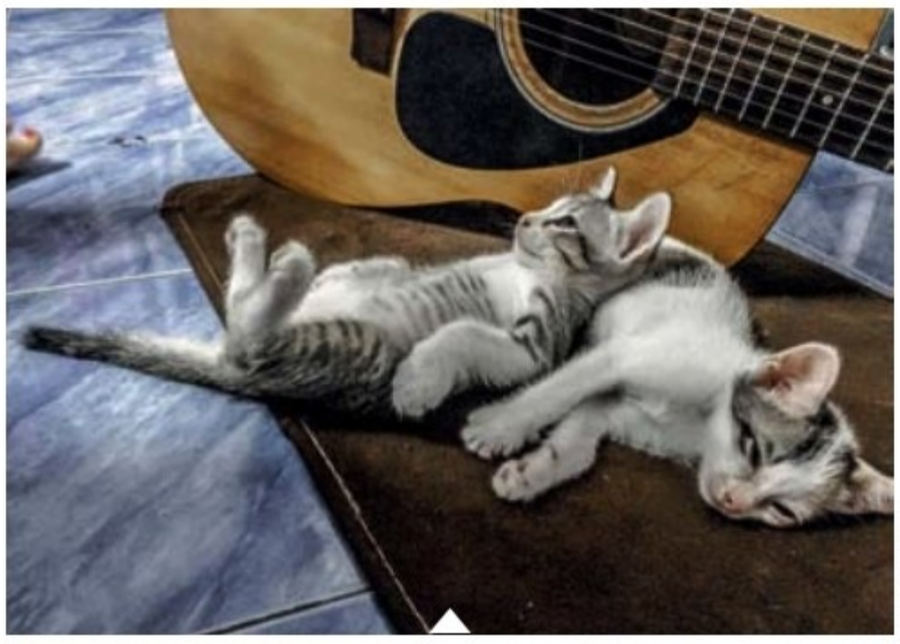
Le secret de cet animal étonnant : il possède deux utérus.

NATUREPL/EBPHOTO

MAMMALOGIE Tout au long de sa vie reproductive, la femelle wallaby bicolore (*Wallabia bicolor*) allaite tout en étant en gestation ! C'est ce qu'ont révélé des échographies en haute résolution menées sur dix femelles de cette espèce de petit kangourou par des chercheurs de l'université de Melbourne (Australie). Le secret de l'animal : il possède deux utérus. À la fin de la gestation, la femelle s'accouple de nouveau. Le nouvel embryon se développe dans l'utérus inoccupé. Lorsque son aîné commence à s'allaiter — protégé dans la poche de sa mère et non plus dans un utérus —, *« le nouvel embryon entre alors dans une longue période d'arrêt du développement qui peut durer jusqu'à 11 mois ou plus »*, expliquent les auteurs de l'étude. L'embryon ne reprend sa croissance que lorsque la succion diminue. Et le cycle recommence. Une stratégie qui a permis à l'espèce de devenir omniprésente sur la côte est de l'Australie. **A.-S. T.**

Une musique relaxante pour chats

ÉTHOLOGIE Des vétérinaires de l'université de l'État de Louisiane (États-Unis) ont montré qu'il est possible d'atténuer le stress des chats lors d'un examen vétérinaire avec de la musique. Plutôt qu'à la musique classique, les félins semblent sensibles à une composition dans une gamme de fréquences similaires aux gammes vocales des chats et qui contient des ronronnements ainsi que des sons de succion (sciav.fr/878chats). **A.-S. T.**



GETTY IMAGES

Basée sur des fréquences similaires à la gamme vocale féline, la musique permet d'apaiser l'animal.

Les baleines sensibles aux tempêtes solaires

CÉTOLOGIE L'échouage des baleines durant leur migration annuelle vers les eaux chaudes où elles se reproduisent est plus fréquent les jours d'intense activité solaire. Les chercheurs de l'université Duke à Durham (États-Unis), à l'origine de cette découverte, supposent que les animaux sont alors davantage victimes d'erreurs de navigation. En effet, les tempêtes solaires perturberaient les données magnétiques grâce auxquelles les baleines se repèrent. **H. C.**

MYSTÉRIEUSE BIRMANIE

Mandalay, golfe du Bengale, temples de Bagan... il y a des noms qui font instantanément rêver. Sans même évoquer la vallée des rubis, célèbre titre de Joseph Kessel, aussi bien journaliste qu'aventurier qui raconta les richesses de Mogok, ville toute empreinte de légendes.

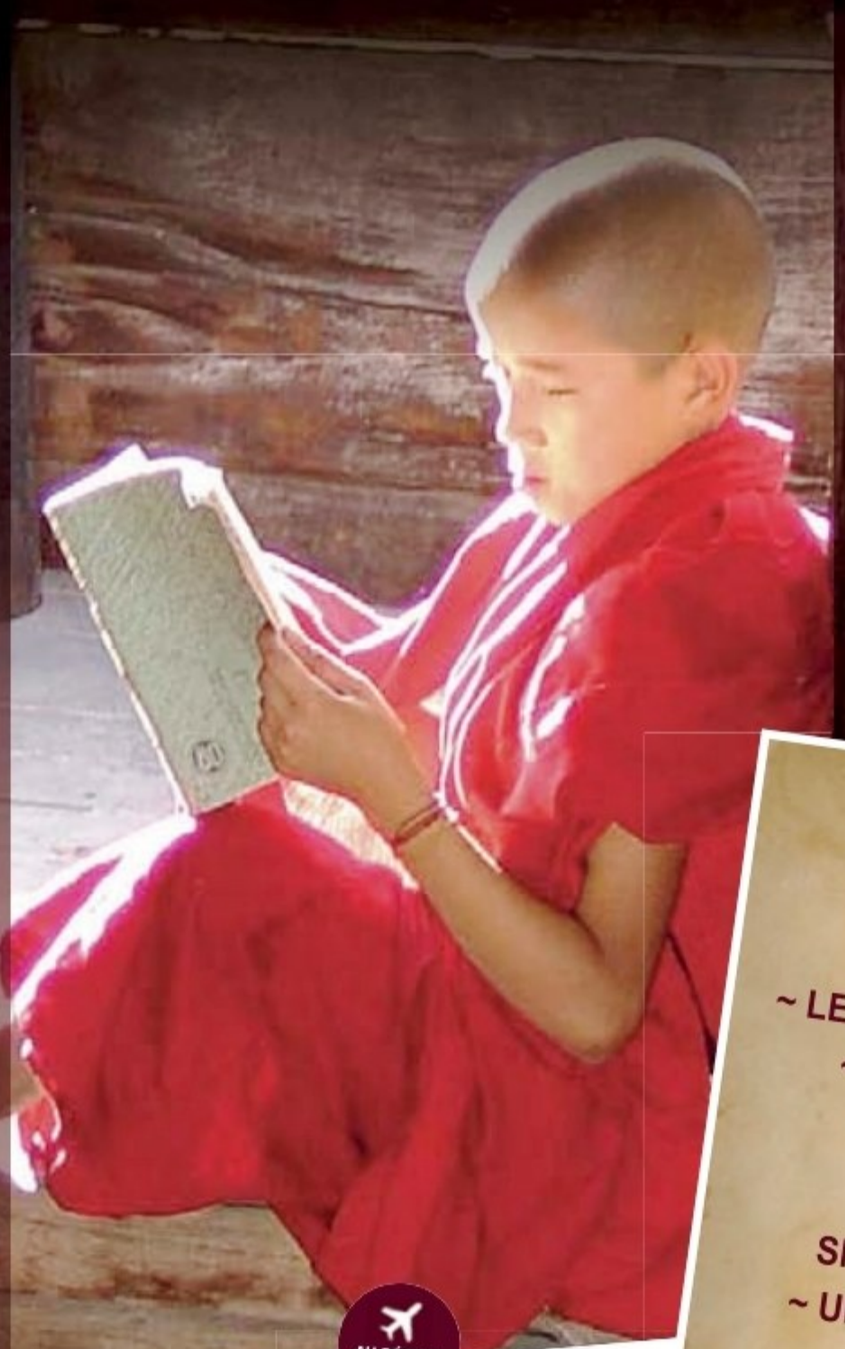
Le voyage proposé aujourd'hui au Myanmar par Sciences et Avenir invite à la découverte de ce pays mieux connu de beaucoup sous le nom de Birmanie, qui paraît toujours aussi mystérieux.

Parce qu'il est synonyme de pierres précieuses - aussi bien saphirs que rubis ! - de jade et autres pierres fines, il nous fallait, pour le décrypter, un spécialiste incontestable du domaine. Ce sera le cas, avec Didier Giard, membre de l'Académie des Sciences d'Outre-Mer et Président de l'Association Française de Gemmologie, fin connaisseur de géopolitique, qui replacera pour nous l'importance du pays dans l'Asean (association des nations de l'Asie du sud-est) et sur les nouvelles routes de la Soie. Ce sont à la fois la découverte de sites somptueux et la compréhension du monde d'aujourd'hui qui vous sont proposées. Un merveilleux voyage en perspective.

Dr Dominique LEGLU
Directrice de la rédaction de Sciences et Avenir

AVEC VOUS À BORD !
DIDIER GIARD
Conférencier

Didier Giard est membre titulaire de l'Académie des Sciences d'Outre-Mer où il occupe le siège de l'ancien ambassadeur André Lewin et est membre de la prestigieuse Société des Explorateurs Français crée en 1937 par Paul-Emile Victor.



LES EXPÉDITIONS
SCIENCES ET AVENIR

CROISIÈRE EN BIRMANIE

FESTIVAL DU PHAUNG DAW OO AU LAC INLE

14 JOURS / 11 NUITS
DU 14 AU 27 OCT. 2020
A BORD DU PANDAW II

LES POINTS FORTS

~ UN CONFÉRENCIER DE TRÈS HAUT NIVEAU SPÉCIALISTE DE LA BIRMANIE.
~ LES VISITES DES PLUS BEAUX SITES DE LA BIRMANIE.
~ UNE DES MEILLEURES PÉRIODES DE L'ANNÉE.
~ LE GRAND MOMENT DE VOTRE CROISIÈRE, LE FESTIVAL DES BATEAUX PAGODES SUR LE LAC INLE, C'EST L'UN DES PLUS BEAUX SPECTACLES AQUATIQUES D'ASIE DU SUD-EST.
~ UN PETIT PAQUEBOT CONVIVIAL DE 20 CABINES POUR 40 PRIVILÉGIÉS.
~ UN TOUT COMPRIS BLEU VOYAGES (excursions, boissons à table, etc...).
~ UN ACCOMPAGNEMENT FRANCOPHONE.

À PARTIR DE
3 700 €/PERS.
Au départ de Paris - En tout inclus

RENSEIGNEMENTS ET RÉSERVATIONS :
BLEU VOYAGES
213 rue de Gerland - Bat 2 - 69007 LYON
TÉL. 04 72 76 75 66
www.expeditions-sciencesetavenir.fr

Bleu Voyages

Neige et Soleil Voyages SAS au capital de 396 800 • RC Bourgoin Jallieu B 398 629 766 • Code APE 7911 Z • Immatriculation Atout France 038110038 • Agence garantie par l'APST • 15 Avenue Carnot - 75017 Paris • Agence assurée pour sa responsabilité civile et professionnelle par le groupe MMA Entreprises n° de contrat 144569079.

Concept : www.pascale-m.com - Crédits photos : Wikimédia / Michael Gunther CC BY-SA 4.0 - Pixabay-CC0

Le bébé, un as de la reconnaissance faciale

Dès les premiers jours après la naissance, une grande partie des réseaux neuronaux nécessaires à la reconnaissance de visages est déjà en place. Un espoir pour le développemente de nouvelles thérapies.

NEUROLOGIE La reconnaissance des visages et des lieux serait innée chez le nouveau-né. Cette découverte surprenante a été faite par l'équipe de Daniel Dilks, professeur de psychologie à l'université Emory, à Atlanta (États-Unis). Il a réussi l'exploit de scanner en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) le cerveau de 30 nouveau-nés endormis, âgés de 6 à 57 jours seulement. Les résultats montrent que, dès les premiers jours après la naissance, une grande partie des réseaux neuronaux nécessaires à la reconnaissance de visages et des lieux est déjà parfaitement en place, ainsi que l'activité cérébrale associée — bien qu'ils ne soient pas encore aussi développés que ceux des adultes. *« Tous les réseaux cruciaux pour notre survie pourraient montrer une telle connectivité précoce »*, prédit Daniel Dilks. Selon lui, *« comprendre comment le cerveau infantile typique est câblé peut nous permettre d'identifier un cerveau atypique et peut-être d'intervenir à un stade précoce du développement pour résoudre certains problèmes »*. Prochain objectif : scanner le cerveau de nourrissons éveillés ! **E. S.**

CORY INMAN/EMORY UNIVERSITY

L'imagerie met en évidence la connectivité neuronale chez le nouveau-né.

97,3% La part des personnes bénéficiant d'un gain cognitif avec une prothèse auditive

GÉRONTOLOGIE L'étude porte sur un échantillon restreint (100 personnes âgées de 62 à 82 ans) mais son résultat interpelle : la quasi-totalité des personnes ayant une perte d'audition ont stabilisé ou amélioré leurs fonctions cognitives après 18 mois d'utilisation d'appareils auditifs. Ces aides pourraient ainsi retarder le déclin cognitif, selon les auteurs. **E. S.**

SOURCE : J. SARANT, UNIVERSITÉ DE MELBOURNE (AUSTRALIE).

Des électrodes pour prédire l'effet d'un médicament

PHARMACOLOGIE Le succès d'un traitement par un antidépresseur particulier pourrait être prédit par l'électroencéphalogramme (EEG). Des chercheurs américains viennent de le montrer pour la sertraline (Zoloft). Les patients qui répondent bien à cette molécule présentent un signal particulier qu'une intelligence artificielle a réussi à identifier. **P. K.**

SOURCE : WEI WU, UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE LA CHINE DU SUD, CANTON.

REUTERS

À partir d'un EEG, un algorithme a pu anticiper l'efficacité d'un antidépresseur. ►

La grippe fragilise les poumons par le microbiote

INFECTIOLOGIE La grippe favorise une surinfection respiratoire en perturbant le microbiote intestinal. Selon une étude du Centre d'infection et d'immunité de Lille, les bactéries qui le composent produisent moins d'acides gras à courtes chaînes (comme l'acétate) utiles aux macrophages des poumons. Ces globules blancs éliminent alors moins bien *Streptococcus pneumoniae*, première cause de pneumonie bactérienne. **E. S.**

L'œil de Lascar

LA THÈSE DU SUICIDE ne permet pas d'expliquer la mort d'Edgar Allan Poe, le 7 octobre 1849. C'est ce qu'affirment deux chercheurs américains qui ont soumis à une IA 309 lettres écrites par l'auteur du *Corbeau* pour y déceler, en vain, des « motifs » linguistiques corrélés à des pulsions suicidaires. **O. L.**

INSERM

QUESTIONS À

Sophie Ugolini

Directrice de recherche au Centre d'immunologie de Marseille-Luminy (Inserm, CNRS, Aix-Marseille Université)

Le stress nuit à l'immunité

Pourquoi le stress psychologique est-il associé à un plus haut risque de maladie infectieuse ?
Avec mon équipe nous avons découvert le mécanisme moléculaire par lequel le stress réduit la réponse immunitaire. En effet, un stress entraîne la production d'hormones telles que l'adrénaline ou la noradrénaline et provoque ainsi des réactions physiologiques de défense : augmentation du rythme cardiaque, de la fréquence respiratoire... Ces hormones se lient à des récepteurs cellulaires, dont le « récepteur ß2 », qui est très présent sur les cellules immunitaires.

Que se passe-t-il alors au niveau des cellules immunitaires ?
Nous avons démontré qu'en se liant à ce récepteur, l'adrénaline provoque une baisse de l'activité de cellules tueuses en charge de combattre l'infection. Pour preuve, si l'on administre à des souris une molécule qui imite l'action de l'adrénaline avant de les mettre en contact avec un cytomégalovirus — qui est pathogène lorsque les défenses sont affaiblies —, la majorité d'entre elles n'y survivent pas. Dans une autre expérience, nous avons montré que 90 % des souris génétiquement modifiées dépourvues de ces récepteurs ß2 survivent à une telle infection.

À quoi sert ce mécanisme ?
Il régulerait le système immunitaire en cas de réaction exacerbée. Mais quand le stress se prolonge, cette régulation peut devenir délétère en diminuant nos défenses contre l'infection. Ce qui dessine une nouvelle piste de recherche : stimuler les défenses de l'organisme en bloquant les récepteurs ß2.

Propos recueillis par E. S.

Une thérapie génique contre la rétinite pigmentaire

OPHTALMOLOGIE Une dégénérescence de la rétine conduisant à la cécité vers l'âge de 40 ans a été stoppée chez six hommes grâce à une thérapie génique mise au point par des chercheurs britanniques de l'université d'Oxford. Un mois après l'injection sous la rétine du vecteur viral portant un gène de secours, leur champ visuel s'est amélioré puis maintenu les mois suivants. Ce premier essai a montré l'innocuité de la méthode contre cette maladie héréditaire. **P. K.**

PHANIE

La maladie entraîne une dégénérescence de la rétine (ici vue au microscope) qui conduit à la cécité.

www.lesproduitsdumois.com

GÉREZ LE STRESS ET BOOSTEZ VOTRE ÉNERGIE !

RETROUVEZ ÉNERGIE ET SÉRÉNITÉ GRÂCE À D-STRESS® BOOSTER !

D-Stress® Booster est une formule unique et **brevetée** qui agit durablement sur le stress du quotidien.

A base de **magnésium de 3ème génération**, il est parfaitement assimilé par l'organisme et agit sans effets secondaires.

L'arginine et la taurine, présents naturellement dans l'organisme, participent à l'assimilation du magnésium. Il contient également des vitamines B2, B3, B5, B6 qui contribuent au métabolisme énergétique et aident à réduire la fatigue.

D-Stress® Booster, une formule unique, votre allié contre le stress du quotidien !

■ Agit rapidement et sans accoutumance. Prendre 1 sachet par jour, au petit-déjeuner. En pharmacie, env. 17€, boîte 20 sachets, ACL 5136879 ou commandez sur www.synergiashop.com.
Laboratoire Synergia. Infos et commandes au 04 77 42 30 10.

PERTE DE CONCENTRATION ET DE MÉMOIRE ?

AVEZ-VOUS DÉJÀ EU LA SENSATION DE NE PLUS AVOIR LES IDÉES CLAIRES, D'AVOIR LE CERVEAU EMBRUMÉ ?

Les comprimés naturels **Cerveau Clair** apportent en quelques heures des vitamines et des nutriments essentiels aux zones de la concentration et de la mémoire du cerveau. Ils contiennent de la L-théanine issue du Thé vert, des extraits de Grenade, de Pin maritime et de Noix, ainsi que des Vitamines B et de l'Iode, dont l'efficacité pour **améliorer les performances mentales et les fonctions cognitives** (mémoire, attention, concentration) a été démontrée dans de nombreuses études scientifiques. Ils protègent également le cerveau du vieillissement et réduisent la fatigue.

Cerveau Clair tonifie et revitalise votre cerveau pour vous aider à garder les idées claires !

■ Boite de 60 cp. En pharmacie - ACL 2951863 - Convient aux jeunes et aux moins jeunes, aux végétariens et aux végétaliens - Non testé sur les animaux. Questions ? Les experts New Nordic vous répondent au 01 40 41 06 38 (tarif local) - www.vitalco.com

POUR VOTRE SANTÉ, PRATIQUEZ UNE ACTIVITÉ PHYSIQUE RÉGULIÈRE
Pour paraître dans cette rubrique, R'Médias 01 46 48 85 41 - photos D.R.

Le robot musicien Shimon va monter sur scène

Ce dispositif compose et interprète à partir d'une base de données de 50 000 titres grâce à des algorithmes d'apprentissage profond.

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE Un robot auteur, compositeur, interprète doté d'une intelligence artificielle s'apprête à enregistrer son premier album contenant une dizaine de chansons. Avant de partir en tournée avec des musiciens humains, lui-même chantant et jouant du xylophone ! Son premier *single*, *Into your Mind*, est d'ores et déjà disponible (sciav.fr/878Shimon). Shimon a été conçu par Gil Weinberg, professeur de technologie musicale au Georgia Institute of Technology d'Atlanta (États-Unis). Ce dernier lui suggère un thème (par exemple l'espace) et le robot compose en s'inspirant des créations humaines. Ainsi, il a généré le texte de *Into your Mind* à partir d'une base de données de 50 000 chansons grâce à des algorithmes d'apprentissage profond. Ceux-ci sont combinés à des règles sémantiques pour produire des rimes et avoir un rythme. La voix de Shimon a aussi été entraînée par une IA à partir de centaines de chansons. Pour Gil Weinberg, il n'est pas question de remplacer les musiciens, mais de les aider à composer et à jouer de la musique avec de nouvelles idées. **O. H.**

GEORGIATECH

La machine partira en tournée avec des musiciens humains.

Un éthylotest de poche prédictif

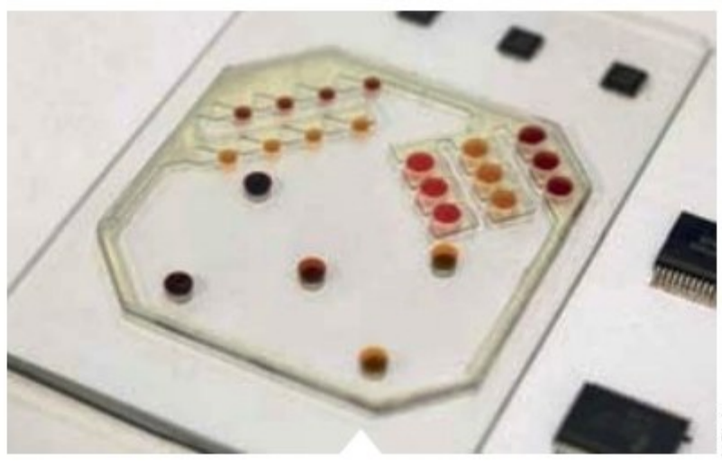
PRÉVENTION À quel moment peut-on reprendre le volant après un repas (modérément) arrosé ? C'est à cette épineuse question que propose de répondre l'éthylotest Ocigo de l'entreprise française Olythe. Il analyse l'air expiré par spectroscopie infrarouge, comme le font les appareils des forces de l'ordre. Une application sur smartphone transcrit les résultats et propose un délai avant que l'alcoolémie redescende sous le seuil légal. **C. G.**

Des lasers militaires pour éblouir les drones

DÉFENSE La marine américaine vient d'embarquer sa première arme laser antidrone opérationnelle sur un destroyer lance-missiles. Elle ne vise pas à détruire le drone mais à l'éblouir en envoyant des flashs lumineux assez intenses pour aveugler voire détruire ses capteurs optiques. Cette technologie doit être déployée sur toute la flotte au cours des deux prochaines années. **O. H.**

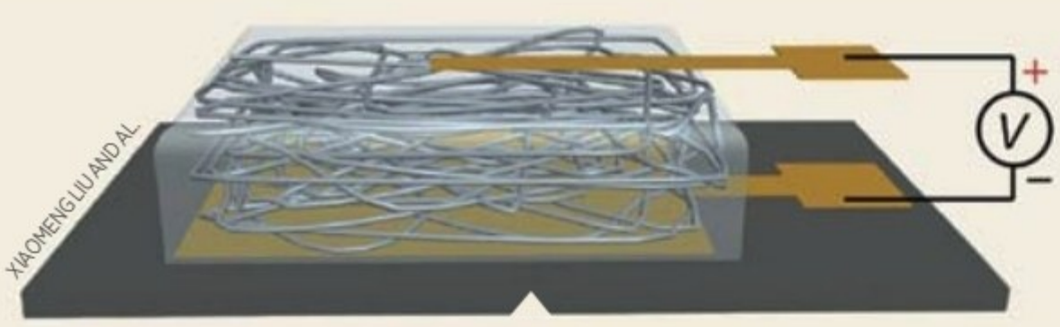
Les robots d'Amazon inspirent les analyses médicales

BIOLOGIE C'est en voyant les robots chargés de marchandises s'agiter dans les entrepôts d'Amazon que les chercheurs de l'université de Californie à Los Angeles (États-Unis) ont eu l'idée de reprendre le concept pour l'appliquer aux analyses biologiques. Ils ont développé des microrobots autonomes capables de manipuler de minuscules échantillons sanguins. Les premiers exemplaires explorent des gouttelettes de plasma, à la recherche de marqueurs moléculaires du cancer. **O. H.**



UCLA

Le micro-système manipule et analyse de minuscules échantillons de plasma sanguin.



Des électrons circulent sur des fils de protéines bactériennes.

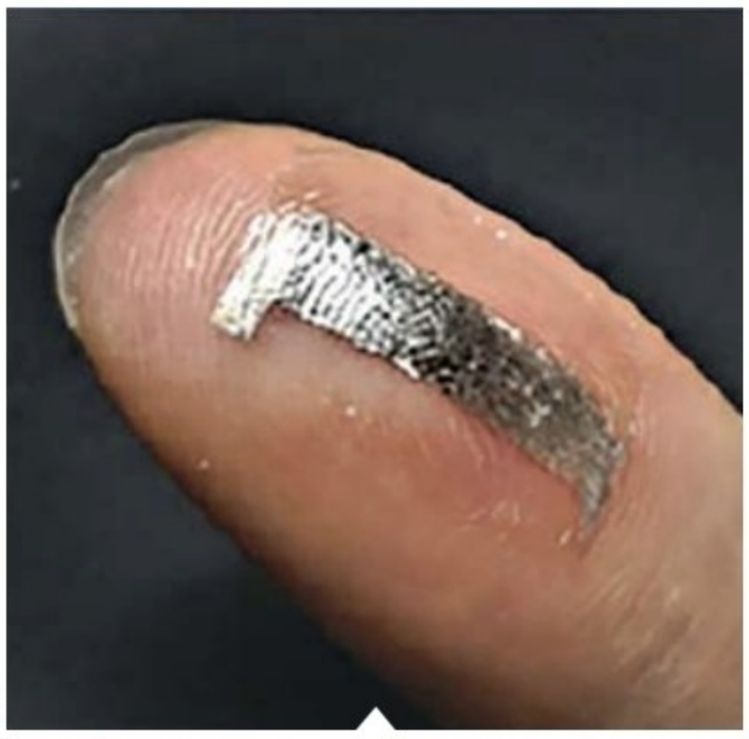
De l'humidité jaillit de l'électricité

ÉNERGIE L'air pourrait devenir une énergie renouvelable ! Des chercheurs de l'université du Massachusetts (États-Unis) ont mis au point le dispositif Air-Gen qui peut en effet transformer l'humidité de l'atmosphère en électricité. Le générateur fonctionne grâce à des fils en protéines bactériennes sur lesquels la vapeur d'eau provoque un mouvement d'électrons. De quoi générer une tension de 0,5 volt durant quelques dizaines de secondes. **H. C.**

Un capteur pour augmenter sa sensibilité

MATÉRIAU Une équipe chinoise a conçu un dispositif inédit pour accroître la sensibilité tactile. Il est constitué d'une membrane en polymère sensible aux plus petites déformations, recouverte d'une fine couche d'argent conductrice. Les signaux sont envoyés à un logiciel qui les analyse et les retransmet sur une interface visuelle. La plus subtile caresse sur une aspérité est affichée, complétant les sensations naturelles. **E. M.**

SOURCE : JING LI, INSTITUT DE NANOÉNERGIE ET NANOSYSTÈMES DE PÉKIN, CHINE.



JINGLI

La membrane de polymère recouverte d'argent réagit aux plus petites déformations.

16,6 % Le record de rendement pour des cellules photovoltaïques à quantum dots

ÉNERGIE C'est un gain de 25 % qu'a obtenu l'équipe de Lianzhou Wang à l'université du Queensland (Australie) avec ces nanoparticules aussi appelées points quantiques. Leur particularité : elles s'adaptent pour réagir à un plus large spectre lumineux lorsqu'elles sont exposées à la lumière et peuvent être intégrées à des matériaux souples et transparents, contrairement aux cellules photovoltaïques actuelles. **E. M.**

Piratage par ultrasons

HACKING Inaudibles pour l'oreille humaine, les ultrasons peuvent permettre de pirater un smartphone. Des chercheurs de l'université Washington à Saint-Louis (États-Unis) ont en effet montré qu'ils pouvaient les utiliser pour contrôler un appareil à distance en activant ses commandes vocales. Captés par le micro, les ultrasons dirigent l'appareil pour qu'il envoie des informations à un volume si faible que seul un micro placé préalablement à proximité peut les entendre. Les chercheurs ont ainsi pu lire des SMS et même passer des appels frauduleux. **O.H.**

SAMHODGSON/THENEW YORK TIMES-REDUX-REA

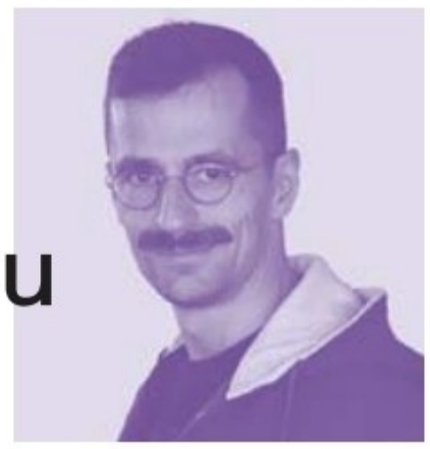
Les forts en langues feraient les meilleurs codeurs.

Les programmeurs ne sont pas forcément des matheux

INFORMATIQUE Un individu doué en informatique est forcément bon en maths... Cette idée reçue vient d'être contredite par des chercheurs américains qui ont étudié 40 adultes apprenant à coder en Python, un langage de programmation courant. Résultat : ce sont les forts en langues et non en maths qui ont progressé avec le plus de facilités. **H. R.**

SOURCE : CHANTEL PRAT, UNIVERSITÉ DE WASHINGTON, SEATTLE, ÉTATS-UNIS.

Nous sommes composés de 65% d'eau et de 35 % de questions.



LA MÉTHODE SCIENTIFIQUE
DU LUNDI
AU VENDREDI
16H00

NICOLAS MARTIN

franceculture.fr/ @Franceculture

En partenariat avec SCIENCES AVENIR

france culture
L'esprit d'ouverture.

© Radio France/Ch. Abramowitz

La collision entre deux faisceaux au sein d'un accélérateur permet la formation de nouvelles particules (vue d'artiste).

Les derniers secrets de LA MATIÈRE

Huit ans après la découverte du boson de Higgs, la traque aux particules inconnues s'amplifie. Pour cela, les accélérateurs gagnent en puissance et en luminosité. Objectif : dépasser le « modèle standard » de la physique qui ne décrit pas l'Univers dans son entièreté.

Dossier réalisé par
Azar Khalatbari

LA CHASSE aux nouvelles particules a commencé ! Et pour attraper ces messagères furtives de l'Univers, porteuses des derniers secrets de la matière, les grosses machines de physique que sont les accélérateurs font peau neuve : plus grande luminosité, détecteurs améliorés... Un vrai bain de jouvence ! Le LHC lui-même, l'accélérateur de particules de 27 km de circonférence tapi sous la frontière franco-suisse, est en attente d'une décision imminente pour sa mue *(p. 36)*. D'ici là, c'est au Japon que la traque des désintégrations rares a commencé grâce à l'expérience Belle II *(p. 35)*. Sans compter que les données recueillies, y compris les plus anciennes, sont désormais passées au peigne fin grâce à des algorithmes d'intelligence artificielle (IA) : plus aucune particule, aussi insaisissable soit-elle, ne doit passer inaperçue ! L'enjeu : ni plus ni moins que le futur de la physique. Car — rappelons-nous — il y a huit ans, les physiciens fêtaient la découverte du boson de Higgs considéré comme la dernière brique manquante du « modèle standard », cette représentation des forces et des particules qui rend compte du monde à notre échelle. Or, aussi parfait soit-il, ce modèle ne parvient pas à décrire l'Univers dans son entièreté : çà et là, le comportement de la matière présente toujours d'infimes détails qu'il n'a pas prédits. Raison pour laquelle, aussitôt le champagne sabré, les physiciens se sont remis au travail, affûtant leurs outils et changeant d'instruments pour labourer d'autres terrains vierges à la recherche de particules inconnues... Avec l'espoir qu'elles pourront enfin compléter le puzzle cosmique. ■

ALAMY/PHOTO12.COM

De nouvelles particules pourraient bouleverser la physique

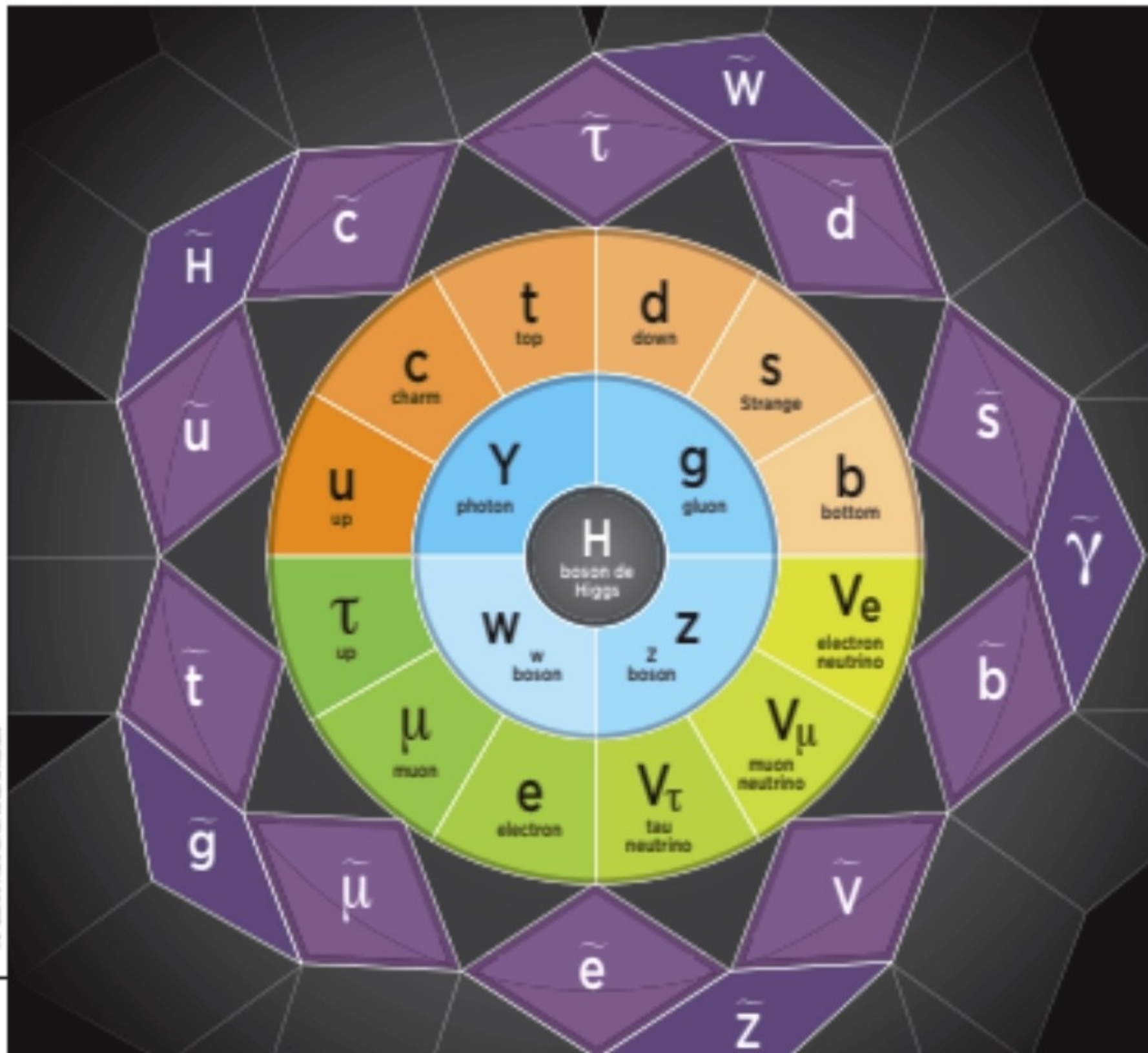
Pour décrire précisément le cosmos, les physiciens doivent disposer de particules encore inconnues et tenter de les observer. La mystérieuse X17 serait-elle la candidate idéale ?

Elle aurait ressurgi voici quelques semaines à peine ! La facétieuse et hypothétique X17 aurait de nouveau montré le bout de son nez dans le laboratoire d'une équipe menée par Attila Krasznahorkay, de l'Institut Atomki à Debrecen (Hongrie). Un endroit qu'elle semble particulièrement apprécier puisque ces mêmes chercheurs avaient déjà annoncé avoir aperçu en 2016 cette étrange particule affublée d'un X comme « inconnue » et de 17 en raison de sa masse, autour de 17 mégaélectronvolts (MeV).

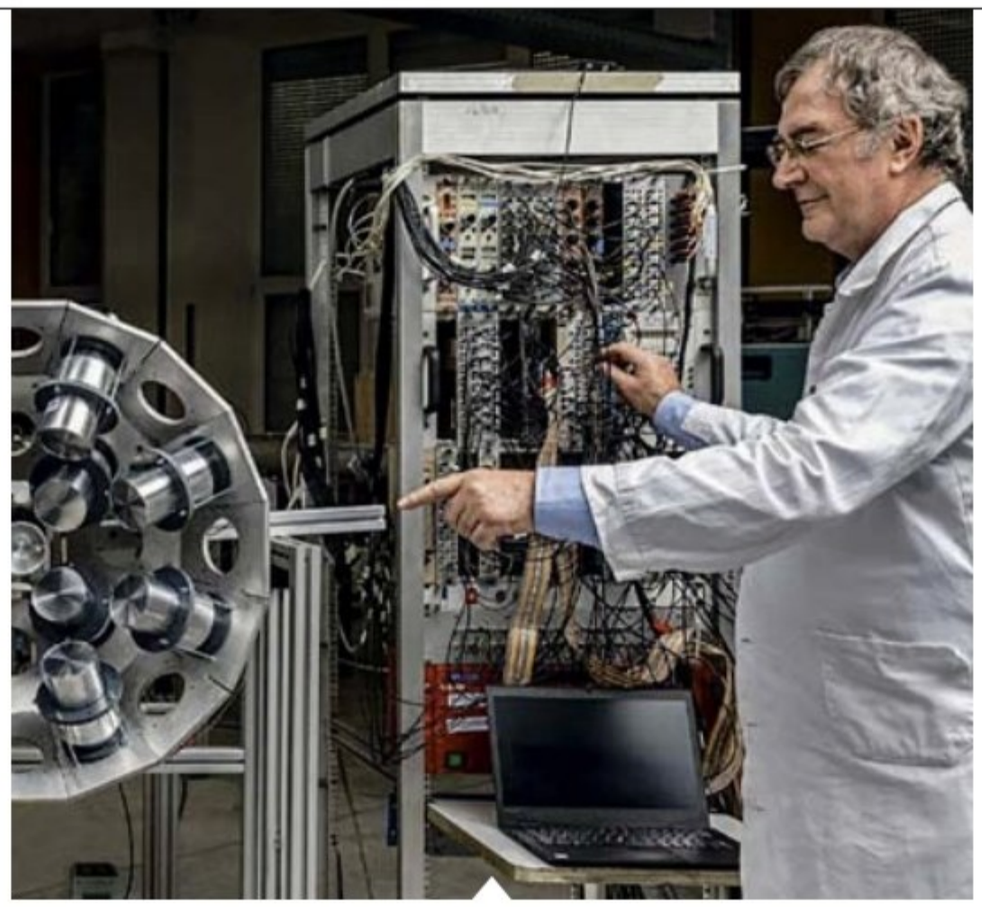
Un écart qui suscite l'intérêt des chercheurs

L'annonce des chercheurs hongrois est fondée sur des expériences mettant en jeu deux isotopes : le béryllium 8 puis l'hélium 4. Selon le modèle standard — un solide édifice élaboré au cours de la seconde moitié du XXe siècle pour expliquer le fonctionnement physique de notre monde —, leur désintégration aurait dû émettre une paire de particules (électron et positon) obéissant à une certaine répartition. Or, les chercheurs auraient constaté un écart par rapport à cette prédiction. De quoi susciter leur plus vif intérêt ! Car tout écart est désormais interprété comme la marque d'une « nouvelle physique », susceptible de résoudre les interrogations auxquelles le modèle standard ne parvient pas à répondre.

X17 serait-elle la première particule de ce nouveau territoire ? C'est ce que pense l'équipe hongroise qui en fournit une interprétation très alléchante : selon elle, X17 pourrait être le signe d'une cinquième force présente dans l'Univers, qui prendrait place aux côtés des quatre



autres bien connues (interaction électromagnétique, interaction faible, interaction nucléaire forte, interaction gravitationnelle)... et expliquerait les phénomènes qui échappent au modèle standard. Ainsi, X17 pourrait permettre l'existence de particules de matière noire légère, cette matière noire dont les scientifiques recherchent la trace depuis des décennies. « *C'est le problème le plus déroutant du modèle standard : celui-ci ne décrit en effet que 5 % de la matière de l'Univers. Les 95 % restants sont inconnus, cette matière manquante restant pour l'heure invisible et indétectable*, explique Laurent Vacavant, directeur adjoint scientifique de l'IN2P3 au CNRS. *La matière noire constitue 25 % du contenu de l'Univers alors qu'elle intervient dans la dynamique des galaxies et la formation des grandes structures du cosmos.* » Et tout indique qu'elle existerait sous forme d'une particule encore inconnue.



COURTESY OF ATTILA KRASZNAHORKAY

Attila Krasznahorkay et son équipe de l'Institut Atomki (Hongrie) ont annoncé avoir détecté des traces de la mystérieuse X17.

Pourtant, l'enthousiasme de l'équipe hongroise n'est pas partagé par la communauté des physiciens. Sceptiques, tous attendent en effet la confirmation de l'existence de cette nouvelle venue. « *Mais les deux résultats sont le fait d'une seule et même équipe* », rappelle Pierre Fayet, du Laboratoire de physique de l'École normale supérieure et du CNRS. En effet, aucun autre laboratoire n'a pour l'heure réussi à reproduire ces résultats. Pour être sûr, le Cern vient de lancer l'expérience NA64 utilisant le supersynchrotron à protons (SPS), qui sert aujourd'hui d'injecteur pour le LHC. Concrètement, un faisceau formé de dizaines de milliards d'électrons est envoyé sur une cible fixe. Objectif : vérifier si, dans les résidus de cette fabuleuse collision, n'apparaîtraient pas quelques X17... si toutefois celles-ci existent. Pour l'instant, rien n'a été observé qui ressemblerait de près ou de loin à ladite particule.

Aucun modèle théorique n'est proposé

La raison du scepticisme des physiciens est aussi plus profonde : l'équipe hongroise ne propose en effet aucun modèle théorique convaincant — fondé sur le principe incontournable de symétrie — pour expliquer l'existence d'une telle particule. Pour comprendre, revenons au modèle standard : celui-ci décrit tout ce qui nous entoure (étoiles et planètes, inerte et vivant), grâce à trois familles de quatre particules. Soit un total de douze particules et quatre forces, auxquelles il faut ajouter le boson de Higgs, au statut à part puisque c'est lui qui explique la masse de toutes les autres particules. Ce tableau bien ordonné est ainsi fondé sur une notion essentielle en physique : la symétrie. « *Nous connaissons tous la symétrie dans un miroir, c'est celle qui revient à échanger la main gauche et la main droite*, explique Pierre Fayet. *Dans le monde des* ▸

THÉORIE DE L'UNIVERS

La supersymétrie : au-delà du modèle standard

Le modèle standard (deux cercles centraux) est constitué de 12 constituants élémentaires de la matière, répartis en six quarks (orange) et six leptons (vert).
Les premiers ne peuvent exister qu'en association. Par exemple les quarks up et down se lient pour former les nucléons, les composants du noyau atomique. De ce fait, un quark seul ne peut apparaître qu'au sein des accélérateurs de particules, tandis que les leptons (électrons ou neutrinos) peuvent exister indépendamment.
En outre, il faut compter quatre particules médiatrices de force (en bleu), échangées à chaque fois qu'une des quatre interactions fondamentales de la nature est à l'œuvre *(lire p. 34)*, ainsi que le boson de Higgs (H au centre) découvert en 2012, qui explique la masse des particules. Au-delà de ce modèle, jugé aujourd'hui incomplet, il y a la supersymétrie, encore à l'étude : elle suppose que chaque particule du modèle standard aurait son équivalent supersymétrique à plus haute énergie, nommé sélectron (noté : $\tilde{e}$), squark ($\tilde{u}$, $\tilde{c}$, ou $\tilde{b}$) ou encore Higgsino ($\tilde{H}$). Ainsi une particule de matière comme l'électron aurait un partenaire supersymétrique, appelé « sélectron » noté $\tilde{e}$. La particularité de la supersymétrie est que $\tilde{e}$ se comporterait comme un médiateur de force (un boson) par exemple $\tilde{z}$. Moyennant cette conjugaison entre force et matière, apparaît un monde miroir du nôtre qui aurait existé au cours des premières fractions de seconde de l'existence de l'Univers, lorsque celui-ci était bien plus chaud et dense. Le modèle standard qui nous est aujourd'hui familier en serait la version basse énergie.

particules, il existe d'autres symétries : celle par rapport au temps, par exemple, qui examine si les lois de la physique sont invariantes lorsqu'on échange le passé avec le futur. »
Cependant, certaines symétries ne sont pas conservées… et c'est ce qui perturbe beaucoup les physiciens. Par exemple, il se forme autant de matière que d'antimatière à chaque fois qu'une quantité d'énergie se matérialise dans les accélérateurs de particules : l'électron est une particule ayant exactement la même masse et les mêmes propriétés que l'antiélectron (positon), la seule différence étant la charge. Théoriquement, il a donc dû y avoir formation de la même quantité de matière et d'antimatière au moment du Big Bang. Dès lors, comment expliquer que notre monde ne contienne que la matière ? Dans quelles conditions et à quel moment cette dissymétrie s'est-elle manifestée au point que l'antimatière a disparu ?

Un monde miroir du nôtre au tout début de l'Univers

Le modèle standard étant muet sur la question, les physiciens doivent chercher au-delà, en essayant de remonter à l'époque où toutes les symétries étaient conservées et où l'ensemble des interactions de la nature ne formaient qu'une seule force *(voir l'infographie ci-contre)*. Et parmi les théories qui pourraient compléter le modèle standard, il y a… la « supersymétrie », formulée dans les années 1970 *(lire l'encadré p. 35)*. Elle suppose que chaque particule du modèle standard aurait son équivalent super-symétrique à plus haute énergie (électron/sélectron, quark/squark, gluon/gluino…). Grâce à ce dédoublement, apparaît ainsi un monde miroir du nôtre qui aurait existé au cours des premières fractions de seconde de l'existence de l'Univers, lorsque celui-ci était bien plus chaud et dense. Le modèle standard qui nous est aujourd'hui familier en serait la version basse énergie. L'existence de cette sorte de monde en miroir séduit les physiciens car seraient alors résolues bon nombre d'énigmes cosmologiques comme la matière noire. Pour l'instant, aucune particule supersymétrique n'a encore été capturée mais les chercheurs sont bien décidés à y consacrer tous leurs efforts. ■

INTERACTIONS FONDAMENTALES

Comprendre les premiers instants de l'Univers

Tous les phénomènes naturels que nous observons dans l'Univers actuel proviennent de 4 interactions fondamentales *(à droite)* que les accélérateurs comme le LHC du Cern ont permis de décrire. La plus connue, la gravité, explique la chute des corps, la ronde des planètes et la dynamique des galaxies ; la force forte maintient ensemble les quarks et assure ainsi la cohésion du noyau atomique ; la force faible explique l'instabilité de la matière par les désintégrations radioactives ; la force électromagnétique intervient dans toute émission de lumière, d'échange de charge électrique et de phénomènes magnétiques. Les physiciens estiment que toutes 4 auraient pu n'en former qu'une au cours des premières fractions de seconde de l'Univers *(à gauche)*. Mais seuls de très puissants appareils — aujourd'hui technologiquement impossibles à concevoir — permettront de vérifier cette théorie.

La théorie du tout

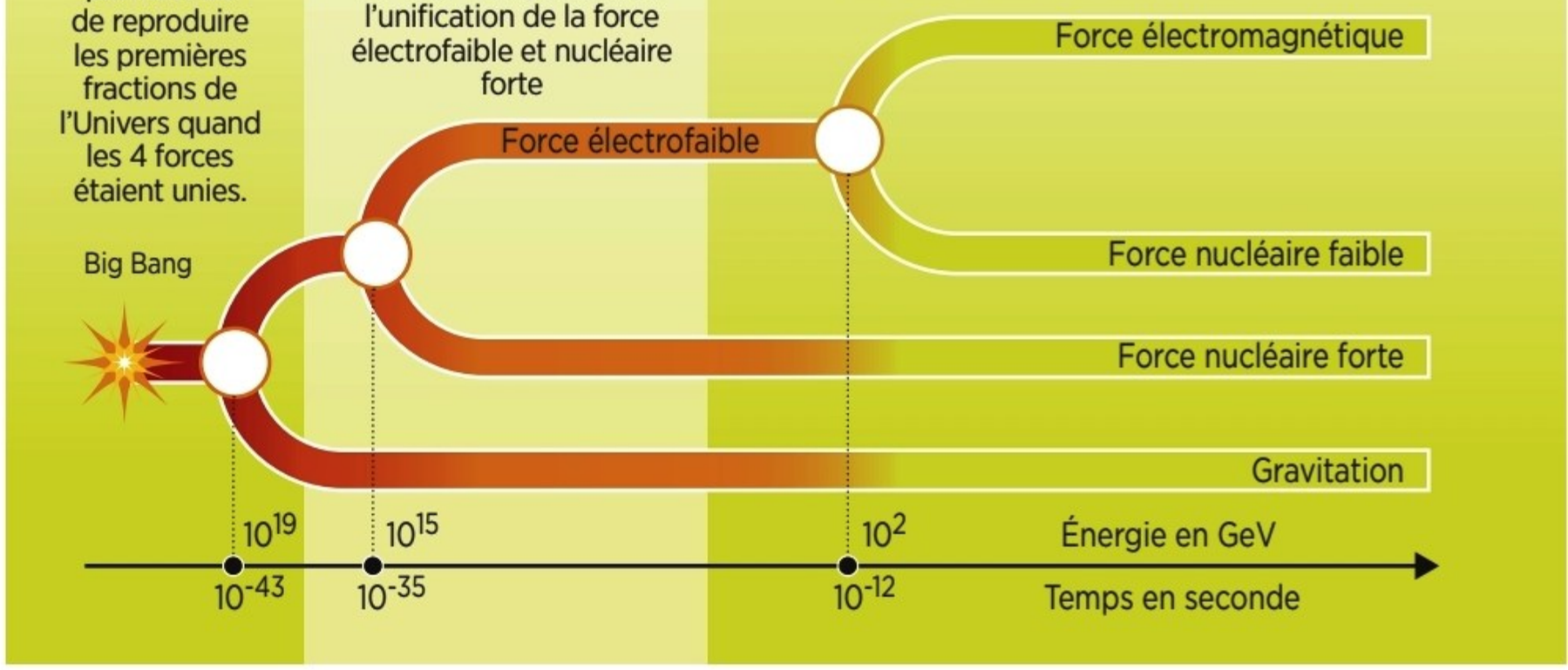
Seul un accélérateur mesurant 1000 milliards de fois le diamètre de la Voie lactée permettrait de reproduire les premières fractions de l'Univers quand les 4 forces étaient unies.

La théorie de la grande unification

Seul un accélérateur de 3 milliards de fois le diamètre de la Voie Lactée peut développer une énergie au delà de 10^{15} Gev indispensable à l'unification de la force électrofaible et nucléaire forte

L'Univers aujourd'hui

Les expériences au LHC ont permis de mettre en évidence l'existence de trois des quatre forces fondamentales (phénomènes lumineux ou magnétiques, radioactivité et même la cohésion des noyaux atomiques). La force gravitationnelle est perceptible dans notre quotidien.



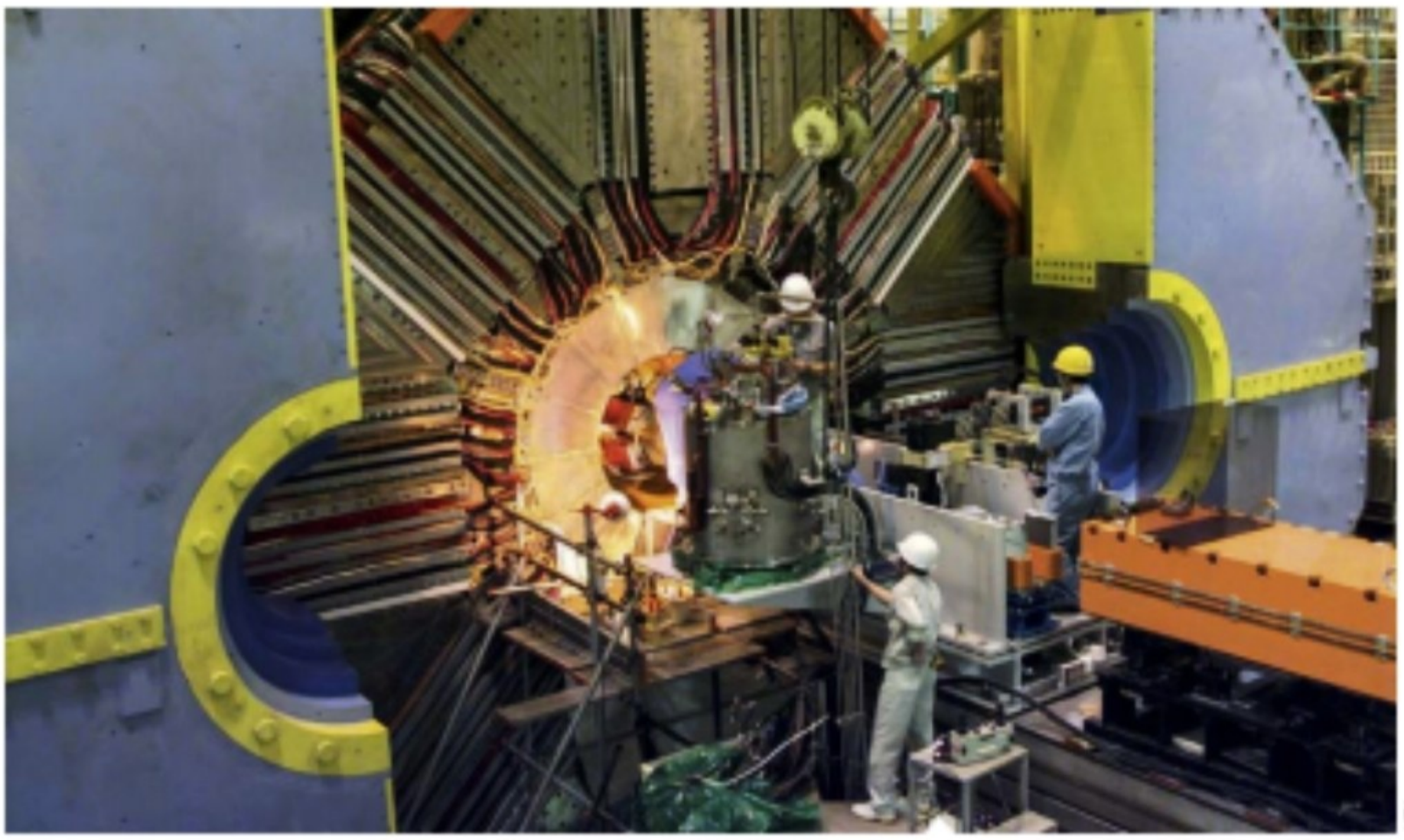
PIERRE FAYET

« Nous sommes en quête de particules qui pourraient éclairer la nature de la masse cachée de l'Univers »

Pierre Fayet, chercheur au Laboratoire de physique de l'École normale supérieure et du CNRS

Belle-II à l'affût des événements rares

Le nouveau détecteur de particules japonais propose une approche originale par rapport aux expériences menées au LHC.

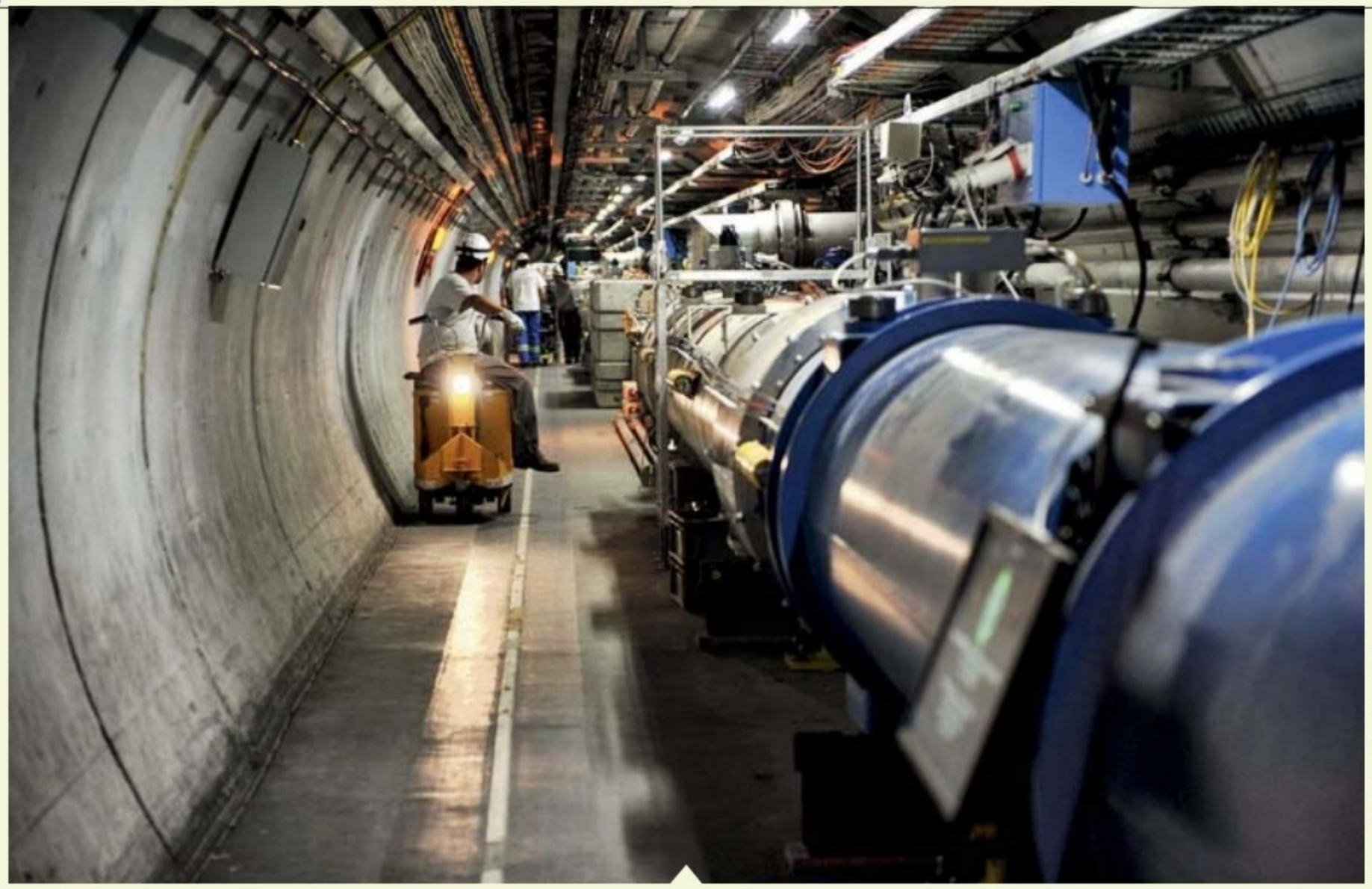


L'accélérateur de particules Super-KEK-B de l'instrument Belle-II, au Japon, possède un faisceau mille fois moins épais qu'un cheveu. Une particularité qui permet d'augmenter les chances de capter des désintégrations exceptionnelles.

À 50 KILOMÈTRES au nord de Tokyo (Japon), la ville de Tsukuba, surnommée la « cité des sciences et de la nature », sera bientôt le nouveau temple de la physique des hautes énergies. En effet, le détecteur Belle-II, implanté dans la ville, doit traquer les ultimes secrets de la matière, rechercher des particules qui ne se manifestent que lors des désintégrations rares dans la nature. Bref, toutes celles dont l'existence n'a pas été prévue par le modèle standard de la physique des particules *(lire pp. 32-34)*. « *Car, malgré son élégance et sa pertinence, ce modèle raconte l'état de l'Univers lorsque celui-ci était déjà âgé de* 10^{-10} *seconde* », explique Isabelle Ripp-Baudot, directrice de recherche CNRS à l'Institut pluridisciplinaire Hubert-Curien, à Strasbourg. Ainsi, une toute petite fraction de seconde lui échappe… mais quelle fraction ! Une foule d'événements inconnus s'y seraient bousculés, du moins est-ce ainsi que l'imaginent les théoriciens. Des particules exotiques — encore inconnues — y gambadaient en raison des énergies faramineuses qui régnaient au cours de ces tout premiers instants. Et ce sont ces particules qui pourraient bien sortir la physique de son impasse actuelle, en expliquant par exemple, l'énigme de la matière noire. Encore faut-il les capturer ! Raison pour laquelle les physiciens ont décidé de labourer des terrains encore vierges selon deux voies, nommées les deux grandes « frontières » : l'énergie extrême et la luminosité extrême. Ce qui explique les vastes chantiers en cours.

Une probabilité de collision plus élevée

La première voie se jouera au LHC *(lire l'encadré p. 38)*. La seconde est l'affaire de Belle-II au Japon. Son accélérateur Super-KEK-B, de 3 kilomètres de circonférence, est enfoui à 10 mètres sous terre à peine. Toute l'originalité de la machine réside dans les caractéristiques de son faisceau : celui-ci est large d'à peine quelques



LAFABREGNE/ALPACA/ANDIA.FR

Au sein du tunnel du LHC, l'enfilade des aimants supraconducteurs contrôle le faisceau.

LUMINOSITÉ ET PUISSANCE

La grande mue du Cern

Le plus grand laboratoire de particules du monde, le Cern, joue son avenir. À l'arrêt jusqu'en mai 2021, son accélérateur de particules principal (LHC : Large Hadron Collider), situé sous la frontière franco-suisse, débutera alors sa progression vers ce que les spécialistes appellent la Haute Luminosité grâce à d'importantes améliorations techniques. Avant que deux grandes options s'ouvrent : construire une machine entièrement nouvelle (FCC : Futur Circular Collider) sur le même principe que le LHC actuel, mais pouvant atteindre une puissance de 100 TeV contre 13, ou opter pour un nouvel instrument (CLIC : Compact Linear Collider), un accélérateur linéaire de 11 km dans lequel circuleront des électrons et des positons. La recommandation européenne sera connue en mai. Pour saisir les enjeux, il faut retourner au Cern, dans le tunnel circulaire long de 27 km où circulent habituellement deux faisceaux superposés : chacun achemine 2556 paquets de cent milliards (10^{11}) de protons dans un sens différent pour une collision à 4 endroits, où siègent des détecteurs (Atlas, CMS, LHCb, Alice). En mai 2021, devrait débuter la troisième période de fonctionnement jusqu'en 2024. Avant l'avènement de la Haute Luminosité (HL-LHC) en 2027. Grâce à de nouveaux aimants, à base de niobium et d'étain, les faisceaux seront 5 à 7 fois plus concentrés, ce qui augmentera la probabilité de collisions : 200 collisions proton-proton à chaque croisement entre paquets contre 40 auparavant. Ainsi paré, le LHC fonctionnera jusqu'en 2037. À cette date, il aura cumulé 3000 femtobarns inverses (fb^{-1}), soit environ 300 millions de milliards de collisions. Contre 150 fb^{-1} aujourd'hui, soit 20 fois plus de données. Coût de l'opération HL-LHC : 950 millions de francs suisses (820 millions d'euros) financé par les 23 pays membres du Conseil européen de la recherche nucléaire avec une participation américaine (100 millions de francs suisses) et des contributions canadienne, japonaise et russe. À l'issue de cette période de 10 ans, le LHC atteignant les limites des perfectionnements possibles, viendra le moment de choisir entre le CLIC ou le FCC. Un choix stratégique ! Car la concurrence est rude. Les Chinois proposent en effet un projet similaire. D'ici là, les chercheurs comptent sur le Super-KEK-B, au Japon, qui fonctionne déjà à plein régime et alimente l'expérience Belle-II *(lire p. 35)*. Certes à une énergie 1000 fois moins puissante que le LHC (11 GeV), mais avec une luminosité qui bat tous les records : fin 2021, il aura recueilli 1 attobarn inverse (1000 fb^{-1}), soit un lot de données supérieur à tout ce qui existe. En dix ans, Belle-II produira 50 attobarns inverses (ab^{-1}), soit 50 fois plus que les expériences précédentes.

CHRONOLOGIE

2010 Démarrage du LHC et première période de fonctionnement

2012-2015
Premier arrêt

2015-2018
Seconde période de fonctionnement

2018-2021
Second arrêt

2021-2024
Troisième période de fonctionnement

2024-2027
Troisième arrêt

2027-2037
LHC Haute Luminosité

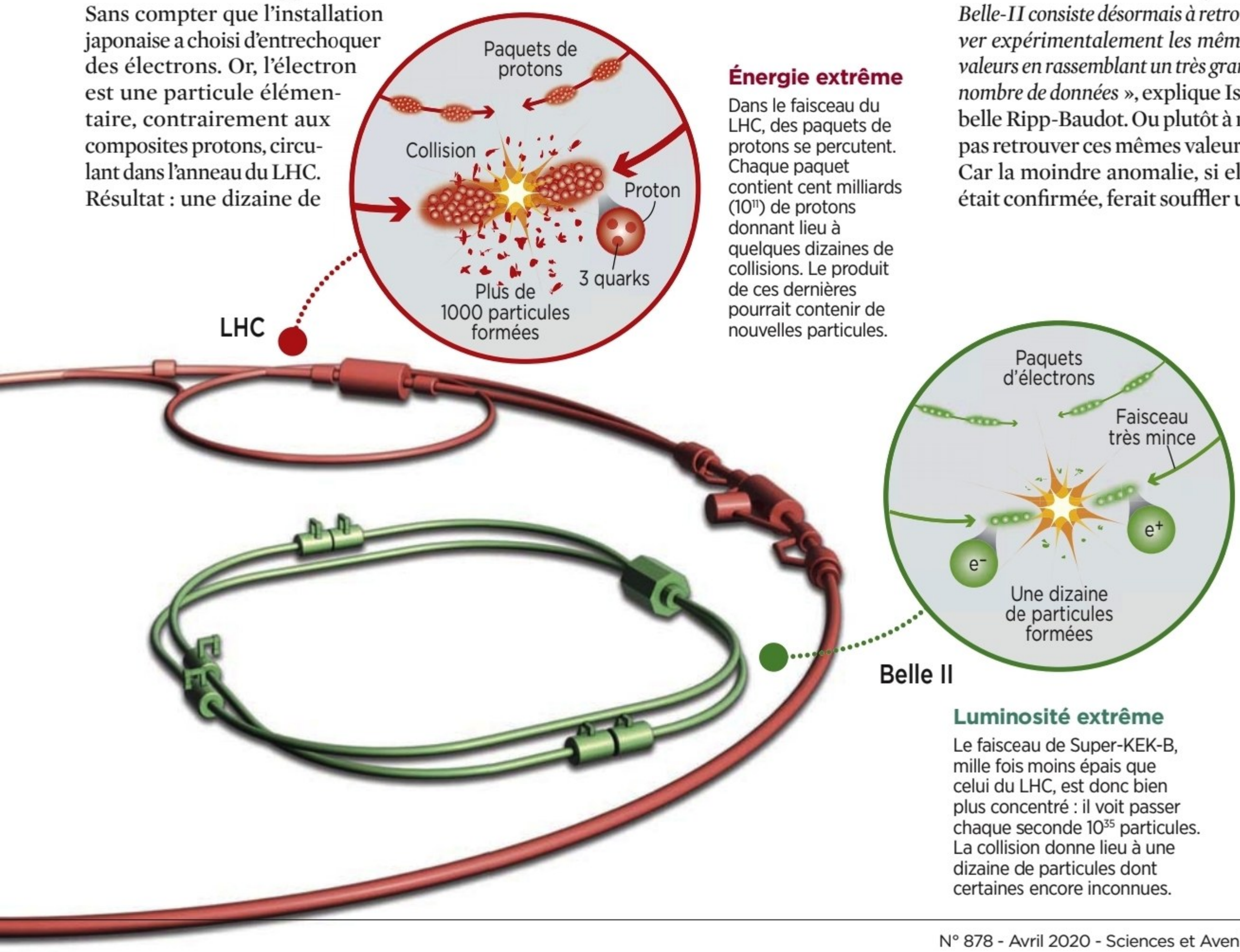
dizaines de nanomètres, soit mille fois moins que l'épaisseur d'un cheveu... et que le faisceau du LHC. C'est dans cet espace minuscule que deux paquets d'électrons et son antiparticule, l'antiélectron (positon), rentrent en contact frontal. « *Cette concentration rend la probabilité de collision bien plus élevée* », explique Isabelle Ripp-Baudot. Chaque centimètre carré du faisceau voit en effet passer chaque seconde 8.10^{35} particules. Un record ! Ce qui justifie l'appellation d'extrême luminosité. Surtout, cela augmente les chances de surprendre les désintégrations rares. « *Fin 2021, Belle-II aura déjà recueilli un lot de données supérieur à tout ce qui existe actuellement !* », s'exclame Isabelle Ripp-Baudot. Sans compter que l'installation japonaise a choisi d'entrechoquer des électrons. Or, l'électron est une particule élémentaire, contrairement aux composites protons, circulant dans l'anneau du LHC. Résultat : une dizaine de « sous-produits » apparaissent à chaque collision, contre près d'un millier pour les protons, ce qui facilite la recherche de la perle rare.

Que pourrait-il bien surgir de ces si précieuses collisions entre électron et antiélectron ? Dans un premier temps, c'est sûr, une paire de mésons b, une particule formée de l'association d'un quark b et d'un antiquark *(lire l'encadré p. 40)*. Le méson b est très rare dans la nature. Alors, c'est au sein des grosses machines de physique qu'il faut le piéger pour un instant extrêmement bref car il se désintègre en différentes particules après un millième de milliardième de seconde (10^{-12}) seulement ! Or, l'énergie et les trajectoires de ces débris de collision potentiels ont été modélisées et calculées de manière très précise grâce au modèle standard. « *Tout le jeu de Belle-II consiste désormais à retrouver expérimentalement les mêmes valeurs en rassemblant un très grand nombre de données* », explique Isabelle Ripp-Baudot. Ou plutôt à ne pas retrouver ces mêmes valeurs ! Car la moindre anomalie, si elle était confirmée, ferait souffler un

I.RIPP-BAUDOT

« Fin 2021, Belle-II aura déjà recueilli un lot de données supérieur à tout ce qui existe actuellement ! »

Isabelle Ripp-Baudot, directrice de recherche CNRS à l'institut pluridisciplinaire Hubert-Curien, à Strasbourg



Énergie extrême

Dans le faisceau du LHC, des paquets de protons se percutent. Chaque paquet contient cent milliards (10^{11}) de protons donnant lieu à quelques dizaines de collisions. Le produit de ces dernières pourrait contenir de nouvelles particules.

Luminosité extrême

Le faisceau de Super-KEK-B, mille fois moins épais que celui du LHC, est donc bien plus concentré : il voit passer chaque seconde 10^{35} particules. La collision donne lieu à une dizaine de particules dont certaines encore inconnues.

DONNÉES ARCHIVÉES

A la poursuite du leptoquark

Une nouvelle particule pourrait surgir sous la frontière franco-suisse. *« Nous sommes en train d'analyser tout ce qui a été enregistré lors des deux dernières périodes de fonctionnement du LHC »*, explique Francesco Polci, du Laboratoire de physique nucléaire et des hautes énergies (LPNHE) du CNRS et de Sorbonne université, membre de la collaboration LHCb, une expérience autour de la physique des quarks b. Celle-ci se concentre sur les collisions entre les paquets de protons qui produisent des quarks b dont elle mesure les propriétés. *« Nous traquons l'influence indirecte d'éventuelles nouvelles particules sur les produits de désintégration des quarks b. Pour cela, nous comparons les prédictions du modèle standard avec les résultats expérimentaux. »* Et les surprises sont légion ! Ainsi, contrairement à ce que prédit le modèle standard, il n'y aurait pas autant de paires « électrons-antiélectrons » que de paires « muons-antimuons ». Les données semblent indiquer que ces dernières sont déficitaires. *« Si cette anomalie est confirmée, cela signifie peut-être qu'une ou plusieurs nouvelles particules interviennent dans cette désintégration »*, précise Francesco Polci. Un candidat possible serait le « leptoquark », une particule encore hypothétique. L'espoir est permis puisque les physiciens feront appel à l'intelligence artificielle pour passer les données au peigne fin lors de la prochaine session qui commencera mi-2021. *« Ce traitement de données en temps réel permettra d'enregistrer cinq fois plus de collisions qu'aujourd'hui »*, note le chercheur.

MAXIMILIEN BRICE/CERN

Des particules hypothétiques pourraient surgir à l'examen des données du LHCb.

vent de folie dans la communauté scientifique. Elle serait en effet le signe qu'une particule inconnue, non prévue par le modèle standard, est peut-être passée par là. Il faudra alors répéter l'expérience des millions de fois pour écarter la probabilité d'une fluctuation statistique, avant de clamer victoire. Ainsi, dans les produits de désintégration des mésons, les physiciens espèrent-ils mettre la main sur des ALP (Axion Like Particle), dont les masses se situeraient entre 100 MeV et 1 GeV. Ces particules sont en effet candidates pour expliquer la masse manquante de l'Univers *(lire pp. 34-36)*. Pendant longtemps, les physiciens avaient aussi caressé l'espoir de découvrir des « axions », des particules neutres et de très faible masse qui auraient existé au tout début de l'Univers et auraient ainsi été susceptibles d'expliquer les grandes structures du cosmos et la répartition de la matière. Mais les axions tels que décrits à l'origine n'ayant pas été trouvés, ils recherchent des particules similaires censées jouer ce rôle.

Une double détection, directe et indirecte

Les perspectives de Belle-II sont d'autant plus alléchantes qu'en matière de détection de particules, la méthode directe — qui consiste à surprendre des produits de désintégration directement dans l'accélérateur — se double de la possibilité d'une détection indirecte. *« Pour comprendre, prenons l'exemple de l'astrophysique*, explique Laurent Vacavant, directeur scientifique adjoint de l'IN2P3 (CNRS). *Certains astres peuvent être détectés directement en pointant le télescope vers eux. Mais leur présence peut aussi parfois être déduite de leur influence sur leur environnement.* » Ainsi, c'est parce que l'orbite de la planète Uranus présentait des perturbations que l'astronome Urbain Le Verrier a supposé l'existence de Neptune. De la même manière, le passage d'une particule plus massive dans les produits de désintégration des mésons pourrait être déduit de son interaction sur les autres. Un second Higgs par exemple ? Voire un troisième, un quatrième, un cinquième... ? Leur existence est en tout cas prédite dans le cadre de la supersymétrie. Belle-II sera-t-elle la première à capturer une nouvelle particule ? *« Jamais auparavant nous n'avions à notre disposition un outil si bien ajusté pour les attraper »*, sourit Isabelle Ripp-Baudot. ■

POUR EN SAVOIR PLUS

Livre

▸ ***Dans le tourbillon des particules,*** Marco Zito, Belin.

Documentaire

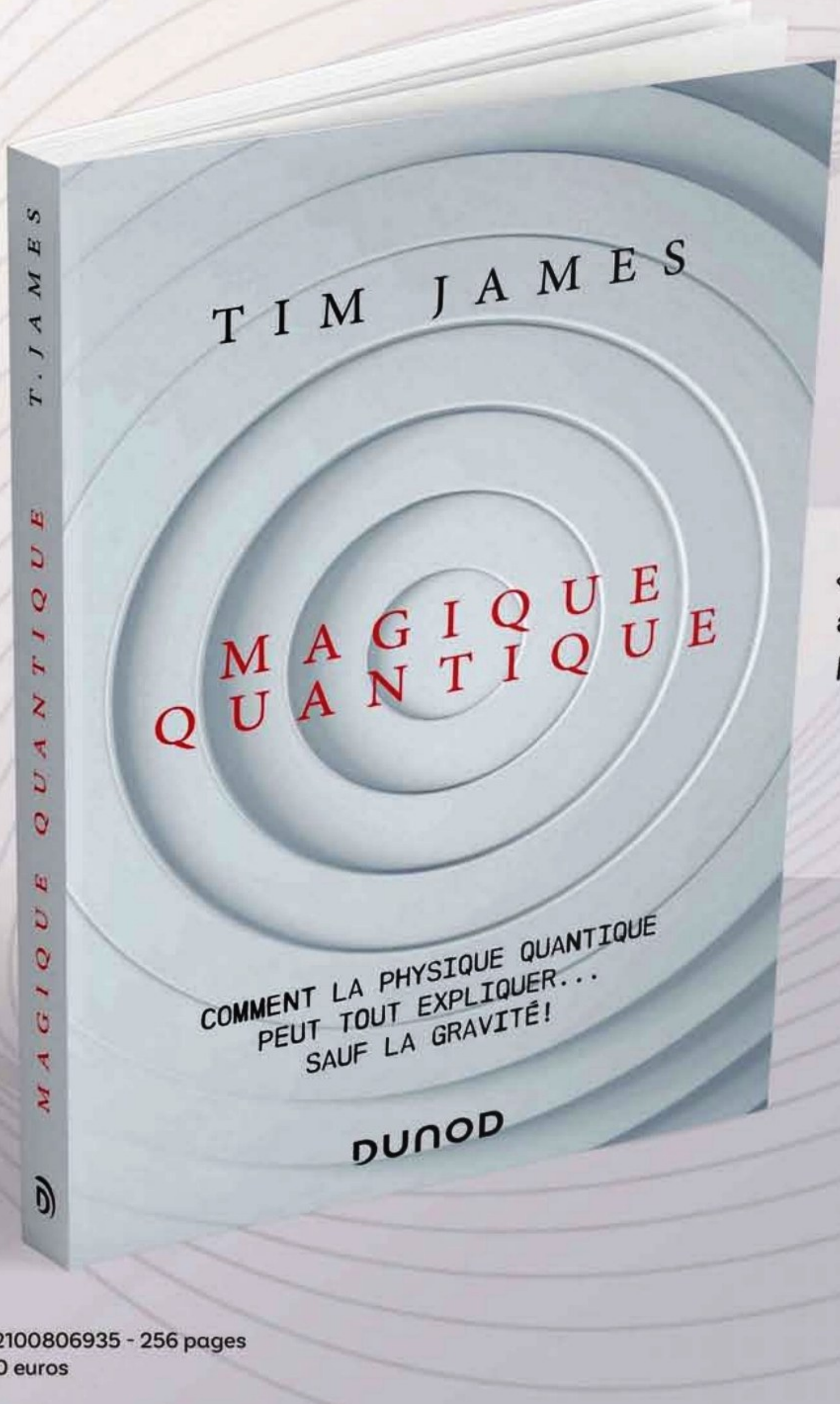
▸ ***Particle Fever. La fièvre des particules,*** Mark Levinson, DVD.

Web

▸ Un article qui décrypte la physique des particules pour le grand public : **sciav.fr/878Particules**

▸ Une mini-conférence « La fascinante histoire du boson de Higgs », par Nathalie Besson, du CEA : **sciav.fr/878boson**

Des univers parallèles à l'antimatière,
laissez-vous guider par le facétieux **Tim James**
à la découverte des bizarreries du monde
de l'infiniment petit !



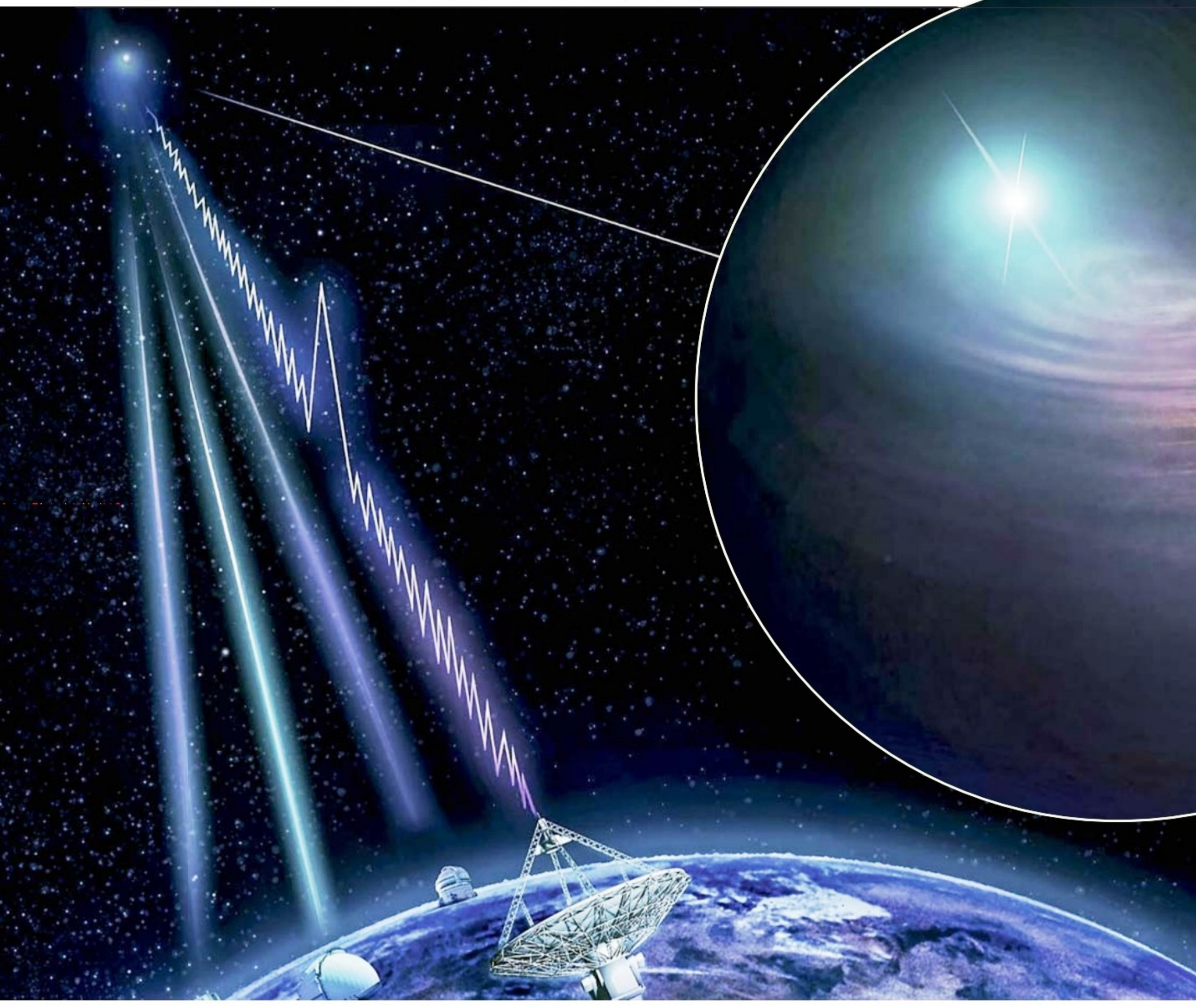
DISPONIBLE EN LIBRAIRIE

« Drôle, léger et profond, avec des analogies originales, parlantes et tranchantes... »

CHARLES ANTOINE
Auteur de
Schrödinger à la plage

9782100806935 - 256 pages
19,90 euros

DUNOD
une page d'avance



Le casse-tête des sursauts radio rapides

Depuis près de vingt ans, ces flashs extrêmement brefs en provenance de l'espace sont captés par les astronomes. Le caractère répétitif de l'un d'entre eux, qui revient tous les 16 jours, surprend les spécialistes et le rend encore plus mystérieux.

Par Stéphane Fay

Un signal radio émis par un astre lointain (loupe) est capté par une antenne sur Terre (au centre). Simultanément, d'autres instruments traquent ce sursaut radio dans diverses longueurs d'onde (à gauche), pour tenter de localiser sa source. (Vue d'artiste.)

DR A. HEWELLES/CSIRO

« DES SIGNAUX LUMINEUX D'ORIGINE EXTRATERRESTRE ? » ; « *Des "rayons lasers" envoyés à travers l'univers dans un but de communication interstellaire ?* »... L'emballement médiatique a été vif à l'annonce de la détection par le télescope canadien Chime, voici quelques mois, d'un étrange signal répétitif venu de l'espace et nommé FRB 180916. Sa durée n'est que de quelques millisecondes mais il émet une énergie équivalente à celle de centaines de millions d'étoiles. D'où le nom de ce type de phénomène : *fast radio burst* en anglais, soit en français, sursaut radio rapide, suivi de la date où il a été repéré en premier, le 16 septembre 2018. Certes, ce n'est pas la première fois que les astronomes captent ces étranges sursauts mais jamais encore ils n'avaient enregistré cette sorte de « morse », réglé sur un cycle de 16,3 jours... Plus précisément quelques bouffées chaque heure pendant quatre jours puis un silence de douze jours avant que cet étrange cycle ne se renouvelle comme des rafales récurrentes d'ondes radio.

L'article publié en janvier dans la revue *Nature* a fait grand bruit. De quoi emballer les imaginations, comme celle — toujours très fertile — d'Abraham Loeb de l'université Harvard (États-Unis). Ce scientifique — comme à son habitude — émet les hypothèses les plus folles comme autant d'aiguillons pour agiter les idées : il imagine la possibilité d'une voile extraterrestre propulsée par un puissant faisceau... Toujours est-il que le mystère s'épaissit autour de ces sursauts avec des questions essentielles : quels types d'astres pourraient les émettre ; comment est générée leur énergie ?

Les observations livrent de nouveaux indices

Si les sursauts radio gardent encore tant de secrets, c'est qu'ils ne se laissent pas surprendre facilement. Bien qu'émettant une énergie pouvant correspondre à celle de plusieurs millions de Soleils, pour les surprendre, il faut tomber pile pendant les quelques millisecondes que dure leur émission. C'est ainsi qu'il a fallu l'examen en 2007, d'anciennes données du radiotélescope Parkes (Australie) par l'astronome Duncan Lorimer, de l'université de Virgine-Occidentale à Morgantown (États-Unis), et son étudiant David Narkevic pour que le premier FRB soit détecté. Surprise ! ils repèrent en effet un sursaut d'une durée de cinq millisecondes daté du 24 juillet 2001 auquel personne n'avait prêté attention. Celui-ci, non répétitif, aurait été émis à moins de 3 milliards d'années-lumière de notre galaxie, sans que les scientifiques ne parviennent à en déterminer l'origine.

Nouvelle avancée en 2016 avec la découverte, toujours dans des archives, d'un autre sursaut se répétant de manière erratique. Les astronomes parviennent alors à établir qu'il provient d'une galaxie naine, au sein d'une région où de jeunes étoiles se forment. Or, la réitération de ce signal indique qu'il n'est pas forcément issu d'un événement ponctuel telle l'explosion d'une étoile. Depuis, d'autres observations ont livré de nouveaux indices. « *Des douzaines de théories ont été publiées. Les sursauts ne durant que quelques millisecondes, les régions où ils se forment doivent être petites, de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres* », explique Jason Hessels, de l'université d'Amsterdam (Pays-Bas), membre de l'équipe qui a réussi à situer FRB 180916.

Si une galaxie tout entière émettait un tel signal, il serait en effet beaucoup plus étendu spatialement et les scientifiques parviendraient à le capter pendant une durée plus longue. « *En outre, leur provenance extragalactique nécessite une énergie très grande pour être encore visible depuis la Terre* », poursuit Jason Hessels. Raison pour laquelle les théories sur l'origine des sursauts évoquent souvent la formation d'une étoile à neutrons (effondrement du cœur d'une étoile sur lui-même) ou un trou noir au sein d'une galaxie. « *Leur énergie pourrait provenir d'un champ magnétique extrêmement fort aux alentours de ces objets, voire de l'interaction de deux étoiles à neutrons très proches l'une de l'autre* », ajoute l'astrophysicien. D'autres ▶

équipes pensent que certains astres pourraient même émettre jusqu'à un sursaut par seconde ! Ceux-ci ne seraient donc pas rares et pourtant *« nous n'avons encore observé aucun astre capable d'en générer »*, rappelle le chercheur Vikram Ravi du Caltech (Institut de technologie de Californie) à Pasadena (États-Unis).

Concocter une théorie presque sur-mesure

Autant d'interrogations qui ont poussé les scientifiques à inscrire les sursauts radio rapides au menu du radiotélescope CHIME (Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment) dès septembre 2018. Situé à l'est de Vancouver (Canada), il est constitué de 1000 récepteurs et a vu sa première lumière en 2017. Capable d'observer de larges portions du ciel — l'équivalent de mille pleines Lunes —, il se révèle vite doué pour détecter des sursauts radio, dès septembre 2018. La preuve : très rapidement FRB 180916 est enregistré. Même si les chercheurs ne l'identifient qu'en janvier 2019, puis huit autres en août 2019. Une véritable moisson, avant que les physiciens ne se penchent sur FRB 180916 pour découvrir son surprenant cycle de 16,3 jours. Avec une étrange périodicité : quatre jours d'émission puis douze jours de silence avant de recommencer. Du jamais vu !
Il fallait donc concocter une théorie presque sur-mesure pour expliquer ce rythme étonnant. Première hypothèse: la source serait en orbite autour de « quelque chose » et ne pointerait son signal en direction de la Terre que tous les 16,3 jours. Mais qu'est-ce qui tourne autour de quoi ? Pour l'heure, mystère. D'où l'importance de parvenir à localiser cette source afin d'avoir une chance de lever un coin du voile. *« C'est un travail très difficile*, souligne Jason Hessels. *Il nécessite un réseau de télescopes distribués sur un large territoire afin d'obtenir une haute résolution spatiale, et un instrument capable d'enregistrer les données d'observation en continu pour avoir une haute résolution temporelle.* » Aussi, afin de localiser FRB 180916, l'équipe de l'astronome a mobilisé l'European Very Long Baseline Interferometry Network (EVN, interférométrie à très longue base), constitué de 22 radiotélescopes répartis sur la planète. Le 19 juin 2019, elle observe pendant plus de cinq heures la région d'où est censé être émis le signal. Banco ! Les 22 antennes surprennent alors quatre nouveaux sursauts. De ce fait en regroupant leurs données, elles offrent aux chercheurs la possibilité de localiser la source de cet étrange signal.

Il existerait plusieurs types de sursauts

Tout pointe vers une galaxie (SDSS J015800) qui ne s'était pas vraiment fait remarquer jusqu'à présent. Qu'à cela ne tienne ! Les astronomes vont utiliser l'un des télescopes de l'observatoire Gemini à Hawaï (États-Unis) pour la voir de plus près. Ils découvrent alors qu'elle appartient à la famille des galaxies spirales et est située à un peu moins de 500 millions d'années-lumière de nous. Soit une galaxie similaire à la Voie lactée, située tout près, presque la porte à côté en termes astronomiques. Autrement dit, largement à portée de télescopes. Et c'est une bonne nouvelle car des observations dans d'autres longueurs

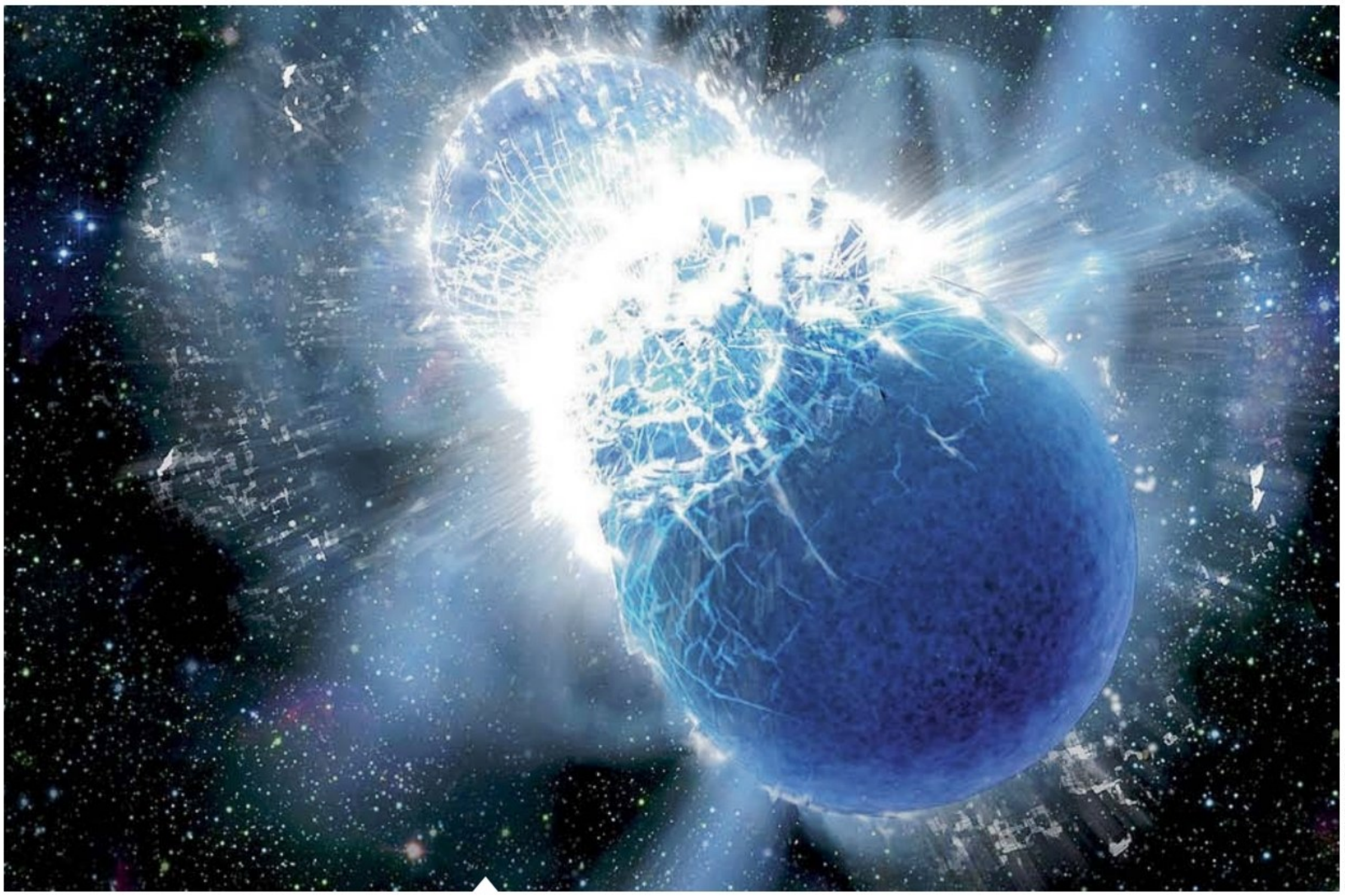
INSTRUMENTS

Des radiotélescopes toujours plus précis traquent les sursauts

Si le radiotélescope CHIME (Canada) peut détecter depuis 2017 des centaines de sursauts radio chaque année, il n'est pas assez précis pour les localiser. Aussi le futur radiotélescope SKA, le plus grand au monde, qui sera inauguré vers 2024, en Afrique du Sud et en Australie, d'une précision dix fois supérieure, est-il très attendu. Quant aux radiotélescopes plus anciens comme ceux d'Arecibo (Porto Rico) ou de Green Bank (États-Unis), ils devraient eux aussi participer à la chasse avec l'installation de nouveaux instruments. En connaissant l'origine des sursauts, les astronomes pourront déterminer la nature du milieu intergalactique que ces signaux ont traversé. S'ils ont interagi avec de la matière ou des champs magnétiques engendrés par les galaxies, il sera possible de déduire les propriétés de ces phénomènes en analysant la manière dont les signaux ont été perturbés.

DRAGONFLY MEDIA/CSIRO/AFP

Le radiotélescope SKA, en construction en Australie (photo) et en Afrique du Sud, sera dix fois plus précis que les instruments actuels.



DANA BERRY SKYWORKS

La fusion de deux étoiles à neutrons, qui libère une énergie très importante, pourrait être à l'origine des sursauts radio rapides.

d'onde devraient permettre de la scruter davantage encore. Pour l'heure, les astronomes estiment que les sursauts semblent provenir d'une région excentrée de cette galaxie où des étoiles sont en train de se former. Mais cette localisation pose plus de questions qu'elle n'apporte de réponses. Car elle ne permet pas de dégager un scénario unique pour expliquer l'ensemble de ces sursauts. En effet, *« le seul autre sursaut radio se répétant dont nous avons localisé la source se trouvait dans une galaxie naine, dans une région de formation d'étoiles,* explique Victoria Kaspi de l'université McGill à Montréal (Canada). *FRB 180916, lui, se situe dans une galaxie spirale comme la nôtre. Cela signifie que les signaux radio répétitifs peuvent être détectés dans des galaxies très variées et ne requièrent donc aucune condition ou endroit particulier pour se former. En outre, ces deux sursauts radio dont on connaît l'origine prendraient naissance dans des environnements où se trouvent des astres jeunes, contrairement aux signaux non répétitifs. Cela pourrait indiquer que ces deux types de signaux ne sont pas émis par les mêmes astres, même s'il est un peu tôt pour conclure ».*

Quant aux sursauts radio qui n'ont pas montré pour l'instant de caractère répétitif, ils pourraient bien cacher leur jeu. À leur propos, Vikram Ravi émet une autre hypothèse : *« Tous les sursauts sont probablement répétitifs, mais certains plus que d'autres. Cela dépendrait de l'évolution de leurs sources qui sont peut-être des étoiles à neutrons. »* Voilà de quoi attendre modestement de cumuler plus d'observations. Car comme s'interroge Jason Hessels : *« Est-il possible d'expliquer cette diversité avec une seule théorie ou faut-il conclure qu'il y a plusieurs sortes de sursauts avec des origines distinctes ? ».* Un casse-tête pour les prochaines années. ■

UNIVERSITÉ D'AMSTERDAM

« Ils doivent se former dans de petites régions de l'espace, de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres »

Jason Hessels, astronome à l'université d'Amsterdam (Pays-Bas), membre de l'équipe qui a localisé FRB 180 916

Mars dévoile ses entrailles

Grâce au sismomètre français de la mission américaine InSight, les scientifiques ont recueilli de précieuses informations sur la croûte martienne : sa nature serait similaire à celle du massif vosgien et elle cacherait une barrière géologique à 10 km sous la surface.

La croûte martienne, analysée par le sismomètre SEIS (en blanc) d'InSight, révèle une première couche altérée, d'une épaisseur de 10 kilomètres, puis une seconde plus consistante, dont on ignore pour l'instant la profondeur (vue d'artiste).

« Nous avons sondé l'intérieur *de Mars comme jamais !* » Alors qu'après un an de collecte de données, les chercheurs de la mission InSight ont dévoilé, dans six articles scientifiques, une moisson de résultats, Philippe Lognonné ne cache pas son excitation. Professeur à l'Institut de physique du globe de Paris, il est en effet, avec son équipe, l'heureux concepteur du premier sismomètre embarqué sur la planète Rouge, baptisé SEIS. Si les résultats concernent aussi les phénomènes météorologiques et le champ magnétique « fossile » engendré par la croûte *(lire l'encadré p. 48)*, ils se concentrent surtout sur la sismologie et la géologie de la planète, l'un des objectifs prioritaires de cette mission pilotée par la Nasa. Grâce à ce sismomètre ultraperfectionné — qui aura nécessité une vingtaine d'années de développement —, les géophysiciens ont pu enregistrer quantité de « tremblements de Mars », les premiers jamais mesurés sur un autre objet céleste que la Terre et la Lune.

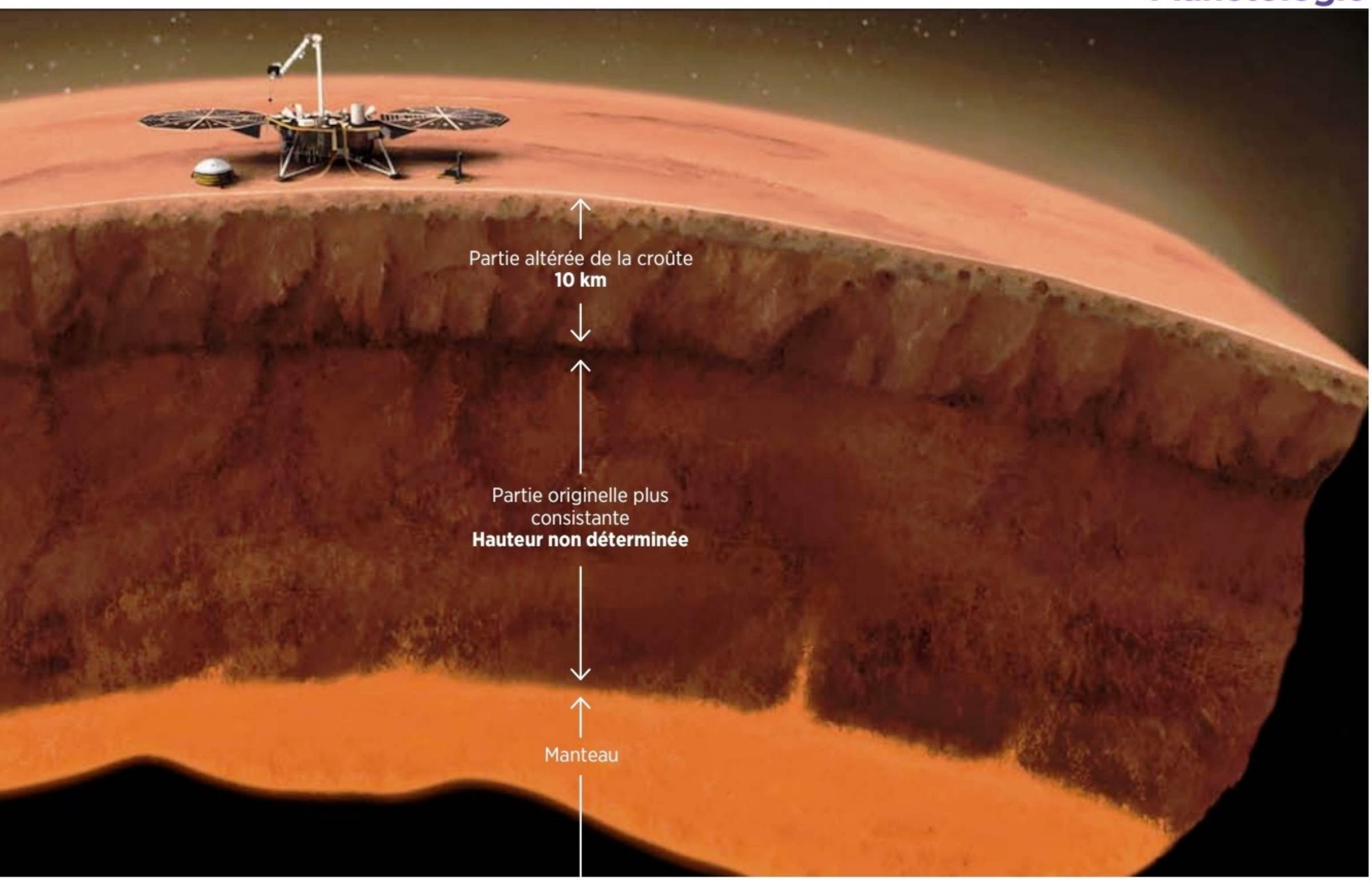
Plus de 460 événements sismiques ont été ainsi détectés entre avril 2019 et février 2020, indiquant que la planète Rouge, bien que froide et au premier abord géologiquement « morte », est toujours active et agitée par des soubresauts. Les signaux sont de deux types. Une première catégorie, largement majoritaire, correspond à des vibrations de fréquence relativement hautes (au-dessus de 2,4 hertz) et de faible intensité. Leur source semble être assez proche du sismomètre et très peu profonde. Chose curieuse, le nombre de ces vibrations ne cesse d'augmenter semaine après semaine ! Alors que l'hiver s'achève et que s'ouvre le printemps dans l'hémisphère nord de Mars, où l'atterrisseur InSight s'est posé fin 2018 avant de déployer son sismomètre, cette augmentation pourrait résulter d'un réchauffement progressif entraînant des microcraquements, des chutes de pierre et autres glissements de terrain. Si cette hypothèse saisonnière et climatique est la bonne, *« nous verrons ces signaux diminuer voire disparaître d'ici à quelques mois,* explique Philippe Lognonné. *En attendant, cette activité sismique nous interroge. Et nous avons encore pas mal de travail pour être sûrs de leur nature ».*

CONTEXTE

Développée par la Nasa, la sonde InSight (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport) s'est posée sur Mars le 26 novembre 2018. Elle est la première spécifiquement conçue pour étudier le sous-sol de la planète Rouge durant une année martienne, soit deux années terrestres. Les dix premiers mois d'observation de la sonde font l'objet de cinq articles distincts dans la revue *Nature Geosciences*, et d'un sixième dans *Nature Communications*.

Un immense réseau de failles volcaniques actif

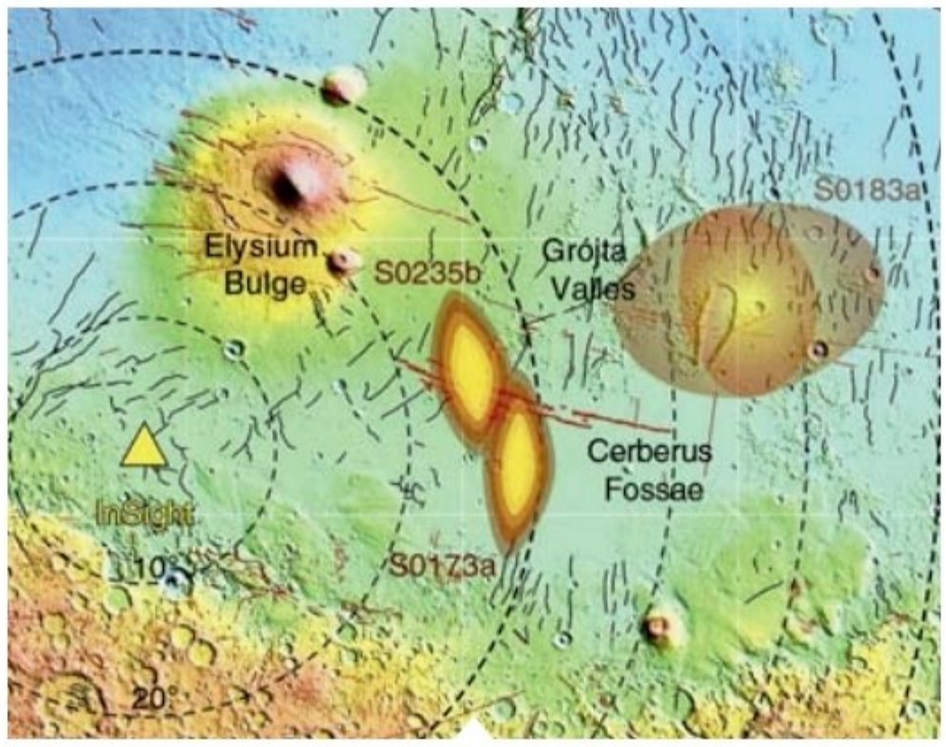
Les signaux du deuxième type ne laissent en revanche guère de doute sur leur origine. Ils transportent des quantités importantes d'énergie, surviennent au rythme régulier d'un par semaine en moyenne et leur fréquence (au-dessous de 1 hertz) est relativement basse. Ils sont en outre beaucoup plus profonds : une cinquantaine de kilomètres sous la surface, dans la croûte et peut-être même au-dessous, même si cette profondeur reste difficile à déterminer avec précision. La source des trois plus gros événements (sur une quarantaine enregistrée au total), d'une magnitude



© IPGP/NICOLAS SARTER (WWW.SEIS-INSIGHT.EU)

comprise entre 3,1 et 3,8, a même pu être retracée. Les mouvements du sol oscillent en effet dans une direction privilégiée au début du train d'ondes. Et l'analyse de leurs propriétés permet de calculer la distance de l'épicentre. Ces trois grosses secousses proviennent ainsi d'une région dénommée Cerberus Fossae, à 1600 kilomètres à l'est d'InSight, qui se caractérise par un immense réseau de failles volcaniques qui serait actif depuis plusieurs dizaines de millions d'années.

En analysant la manière dont les ondes sismiques sont absorbées, atténuées ou rebondissent sur les roches et les hétérogénéités de la croûte, les chercheurs ont pu sonder l'intérieur de la planète à des dizaines de kilomètres de profondeur. « *Une première*, se réjouit le géophysicien, *car les techniques d'analyse, au moyen de radars, exploraient jusqu'alors une cinquantaine voire une centaine de mètres tout au plus.* » Les scientifiques ont obtenu ainsi deux grands résultats. Ils ont pu, tout d'abord, déterminer que la croûte martienne avait des caractéristiques intermédiaires entre celles de la Terre, qui contient énormément d'eau, et de la Lune, qui est en revanche très sèche en raison de l'absence d'atmosphère et de son origine cataclysmique. Cette croûte ressemble ainsi, d'un point de vue géologique, aux massifs cristallins anciens de la Terre, tel le grand massif hercynien composé notamment, en France, des Massifs armoricains, central et vosgien.



© D.GARDINI ET AL

L'épicentre des deux plus gros séismes martiens a pu être retracé par l'instrument SEIS. Il se situe à 1600 km à l'est de la zone où est posée InSight, dans la région Cerberus Fossae.

Une croûte divisée en deux parties

L'autre résultat important concerne la structure de la croûte. À environ 10 kilomètres de profondeur, certaines ondes sont en effet réfléchies et changent même de nature, indiquant une importante discontinuité. Elles se déplacent aussi à une vitesse différente, 2 km/s au-dessus contre 3 km/s en dessous. La croûte serait ainsi divisée en deux parties : une apparaissant altérée jusqu'à 10 kilomètres ; une autre plus profonde, plus consistante et origi-

NASA/GSFC

Depuis la perte de son bouclier magnétique il y a 4,1 milliards d'années, la planète Rouge est exposée aux agressions du Soleil (ici une tempête, vue d'artiste).

OBSERVATION

Les mystères du champ magnétique

Pourquoi le champ magnétique de Mars a-t-il disparu faisant d'une planète ressemblant à la Terre primitive le désert glacial que l'on connaît aujourd'hui ? La sonde Mars InSight a emporté des instruments pour aider à répondre à cette question qui taraude les astrophysiciens. *« C'est la première fois qu'un magnétomètre est déposé à la surface de Mars »*, explique Benoît Langlais, chercheur au Laboratoire de planétologie et géodynamique de Nantes (universités de Nantes et d'Angers, CNRS), et coauteur de l'étude consacrée au champ magnétique martien. Première mission : vérifier les données acquises en 1997 par l'orbiteur Mars Global Surveyor qui ont révélé que la croûte martienne contient les traces d'un champ magnétique passé dix fois supérieur à celui mesuré sur la Terre. Mission accomplie avec une surprise de taille à la clé : *« Au sol, nous avons découvert que le champ magnétique crustal de Mars n'était pas dix fois supérieur à celui de la Terre, mais cent fois !* s'enthousiasme Benoît Langlais. *On pensait être surpris, mais pas à ce point.* » S'il s'avérait que ces roches émettrices d'un signal magnétique sont plus proches de la surface que ce que prédisent les modèles théoriques, *« il faudrait remettre en question le consensus selon lequel la planète Rouge a perdu son champ magnétique il y a 4,1 milliards d'années »*, assure le chercheur. Et ce n'est pas tout : InSight a remarqué que de temps à autre, le champ magnétique martien se mettait à « pulser ». De telles oscillations sont certes régulièrement observées sur Terre lorsque l'activité solaire est intense, mais sur Mars, elles se produisent à chaque fois aux alentours de minuit heure locale. *« Ces pulsations durent de vingt minutes à une heure environ, et ne se produisent pas tous les jours*, précise le géophysicien. *Nous voilà en présence d'un mystère de plus.* » Pour le moment, InSight semble apporter plus de questions que de réponses ! **Marine Benoit**

Des pulsations surviennent aux alentours de minuit heure locale durant 20 minutes à 1 heure

nelle. *« Personne n'avait envisagé une telle subdivision »*, souligne Philippe Lognonné. Quels processus ont pu produire une telle altération de la croûte ? Comment les raccorder à l'activité géologique passée de la planète, les bombardements météoritiques et les anciennes circulations d'eau il y a plusieurs milliards d'années ? Les géophysiciens vont tenter de trouver les réponses.

Des dizaines de tourbillons balaient le sol martien

Un dernier résultat concerne la partie la plus superficielle de Mars. Il a été obtenu, non grâce aux ondes sismiques produites par les failles ou le réchauffement saisonnier de la planète, mais par les vibrations provoquées par des... tourbillons atmosphériques ! Le sismomètre en a détecté plus de 10 000. Chaque jour, des dizaines de tourbillons balaient en effet le sol martien à proximité de l'instrument. Or la pression chute au centre des vortex, créant un effet d'aspiration, un peu comme si l'on déplaçait une ventouse à la surface du sol. L'analyse de ces petites déformations et des vibrations qu'elles engendrent a permis d'estimer l'élasticité des dix premiers mètres du sol. Et de constater, là encore, une discontinuité ! Jusqu'à 2 ou 3 mètres, celui-ci est composé ainsi de sable très fin, alors que les roches au-dessous sont beaucoup plus dures et rigides.

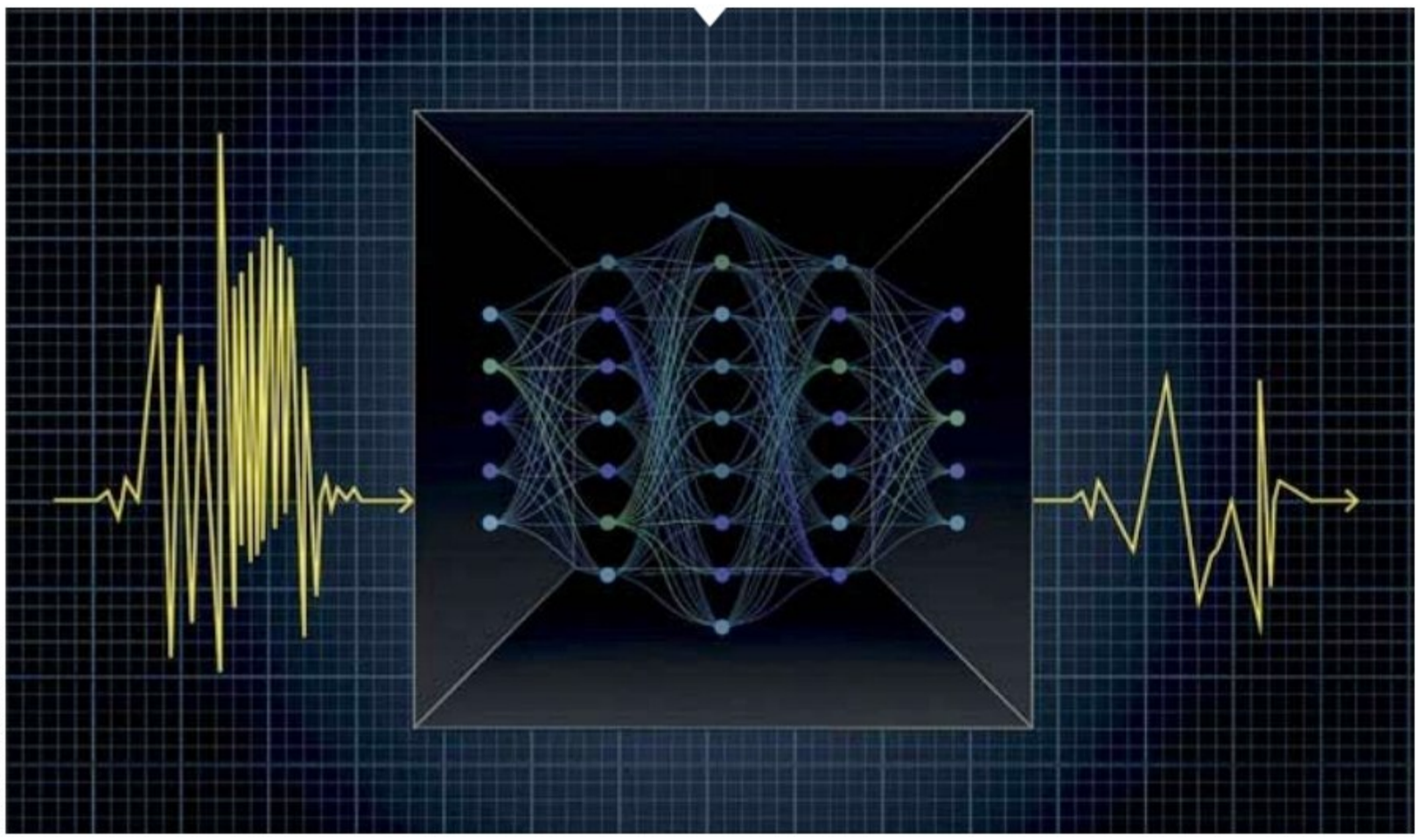
Les scientifiques de la mission InSight, qui collectera des données pendant encore au moins un an, attendent toutefois encore le *« big one »*. Un gros séisme, soit peu profond, soit très intense (d'une magnitude dépassant 4,5), qui exciterait toutes les ondes sismiques et permettrait de recueillir des informations inestimables sur le manteau et le noyau de Mars. ■

Franck Daninos @fdaninos

L'IA vient au secours des géologues

Les réseaux de neurones artificiels permettraient de reconstituer l'ensemble d'un signal sismique, y compris les basses fréquences jusqu'à présent masquées par le bourdonnement naturel de la Terre.

Révéler les failles sismiques ou les éventuelles réserves d'hydrocarbures sans le moindre coup de pioche grâce à une analyse intelligente d'un sismogramme. Cette approche, fondée sur la technique de l'apprentissage profond d'un réseau de neurones artificiels, a permis d'accéder à la partie jusque-là inexploitable d'un signal sismique Un résultat que l'on doit à une équipe du Massachusetts Institute of Technology (MIT, Cambridge, États-Unis).
Rappelons que jusque-là, la seule manière de disposer d'une image du sous-sol sans avoir à creuser est d'utiliser la « sismique », comme le font les compagnies pétrolières : une explosion génère des trains d'ondes dont la vitesse de propagation dans le sous-sol dépend de la nature du milieu. Si une onde rencontre une nappe de pétrole ou une faille, celles-ci se comportent comme un miroir : l'onde est réfléchie et un « profil sismique » permet de situer les « obstacles ». En analysant l'enregistrement ainsi obtenu, il est alors possible de reconstituer la structure des couches géologiques. Mais aujourd'hui, les spécialistes n'utilisent qu'une partie du signal. En effet, les basses fréquences sont masquées par le bourdonnement naturel de la Terre dû au frottement des vagues sur les fonds océaniques ou encore par le mouvement des masses d'air au-dessus des reliefs des continents. Bref, un bruit parasite continu qui entrave le travail des sismologues. Or ce sont les basses fréquences qui permettraient justement de mieux déterminer à quelle profondeur se situent ces structures...
« Tout le défi de cette nouvelle méthode est de reconstituer les basses fréquences à partir des hautes fréquences pour donner accès à l'ensemble du signal », explique Sophie Giffard-Roisin, spécialiste d'apprentissage profond et intelligence artificielle à l'université Grenoble-Alpes.



CHRISTINE DANILOFF, MIT

Des sismogrammes synthétiques, créés à partir de modèles de Terres virtuelles, permettent au réseau de neurones de s'entraîner.

Une recherche en plein essor

Pour l'instant, les tentatives s'effectuent à partir de neuf modèles de « Terres virtuelles », chacune ayant une composition différente du sous-sol. À partir d'un grand nombre d'exemples enregistrés, le réseau de neurones artificiels doit retrouver les basses fréquences conformément à celles du signal synthétique... Et ça fonctionne !
« Les raisons d'un tel succès sont la grande adaptabilité de ces réseaux, bien que nous ne connaissions pas les critères physiques sur lesquels se base l'algorithme d'apprentissage, reprend Sophie Giffard-Roisin. *C'est tout le domaine d'une recherche en plein essor nommée Explainability AI, soit intelligence artificielle explicable. »* Une fois l'apprentissage terminé, il ne restera plus qu'à le confronter à des enregistrements sismiques réels pour dévoiler une partie inconnue de ce qui se trouve sous nos pieds. ■ **Azar Khalatbari**

Des fresques étonnamment bien conservées ont été dégagées rue du Vésuve : à gauche, Léda séduite par Jupiter métamorphosé en cygne ; Priape, dieu des plaisirs charnels, pesant son sexe (page de droite). Mais sitôt mises au jour, les peintures doivent être protégées de la lumière (au centre).

Les nouveaux trésors de Pompéi

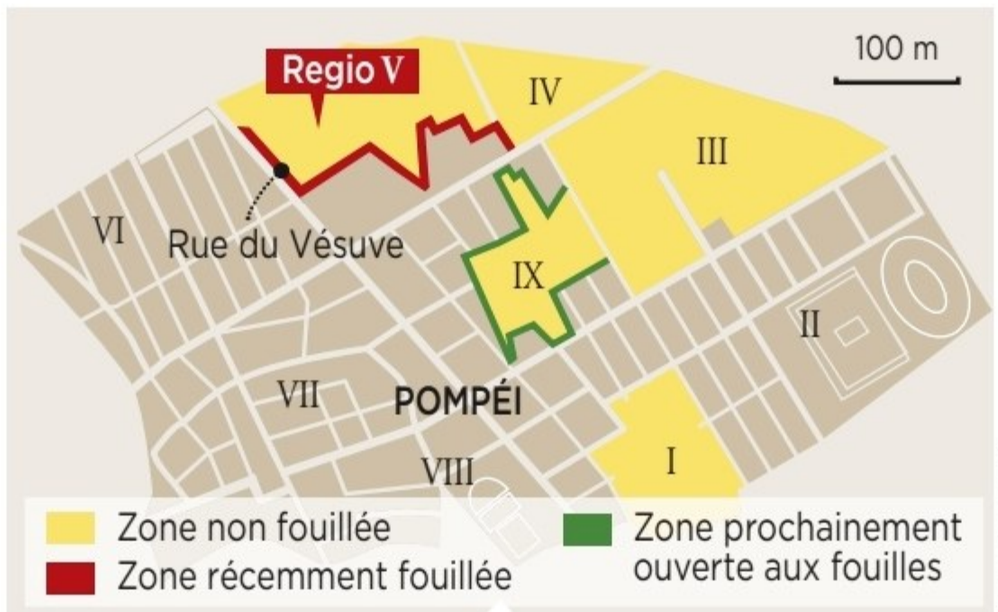
Ouverte aux fouilles depuis plusieurs mois, la Regio V ne cesse de livrer des merveilles. En dépit des problèmes de conservation, le directeur du site envisage d'étendre les investigations à un nouveau secteur.

Par Sylvie Briet, envoyée spéciale à Pompéi

IL FAUT BEAUCOUP MARCHER pour atteindre la Regio V, quartier situé tout au nord de Pompéi *(voir carte, p. 51)*. Le plaisir de battre les gros pavés inégaux et glissants reste intact malgré les trombes d'eau qui s'abattent sur le site en cette journée d'hiver. Mais toute la vulnérabilité de la ville antique, enfouie depuis l'éruption du Vésuve en 79 de notre ère, apparaît crûment sous l'orage : les peintures millénaires, à peine protégées, s'humidifient, les flaques stagnent au pied des murs et les toits de tôle sur certains édifices semblent bien dérisoires. Une fragilité d'autant plus inquiétante qu'une petite partie de la Regio V, jusqu'alors inexplorée, a été ouverte aux fouilles durant deux

PHOTOS : PATRICK ZACHMANN/MAGNUM PHOTOS

ans. Pour la première fois depuis la Seconde Guerre mondiale, une grande campagne de restauration a en effet été entreprise en 2018, à la frontière entre la zone dégagée et la Regio V qui est toujours enfouie sous 6 mètres de lapilli et autres roches volcaniques. Mais, chaque coup de truelle révélant des trésors, les archéologues n'ont pas résisté : ils ont étendu leurs fouilles sur 1000 m² et enchaîné les découvertes spectaculaires à un rythme jamais vu. Ce qui réjouit Massimo Osanna*, le très médiatique directeur général du Parc archéologique de Pompéi qui, après de gros travaux de restauration, a fait rouvrir au public en février trois maisons situées dans d'autres secteurs de la villes — dont certaines fermées depuis 40 ans — ainsi que les thermes.



BRUNO BOURGEOIS

22 ha sur les 66 ha du site demeurent inexplorés. La partie nord de la cité commence à être investie.

Aux frontières de la Regio V, seuls les ouvriers et les archéologues sont habilités à franchir les barrières pour emprunter la rue du Vésuve qui monte vers le volcan. Dans l'une des premières demeures dégagées récemment surgit, dès l'entrée, une fresque de Priape, dieu de la fécondité, des jardins et des plaisirs de la chair, pesant son sexe sur une balance équilibrée avec des pièces d'argent. Outre sa symbolique érotique, Priape était censé apporter postérité et chance aux propriétaires de la villa. Plus loin, dans l'une des chambres, une petite peinture de Léda a gardé intact son pouvoir de séduction. Lascive et nue, l'épouse du roi de Sparte fixe, sans gêne aucune, ses visiteurs du XXIe siècle. Entre ses jambes, Jupiter a pris la forme d'un cygne pour la séduire. Dès sa découverte, Massimo Osanna, qui maîtrise habilement l'usage des réseaux sociaux, avait publié des clichés sur Instagram. Aujourd'hui, il s'extasie encore : *« L'état de conservation des fresques*

MASSIMO OSANNA
DIRECTEUR GÉNÉRAL DU PARC ARCHÉOLOGIQUE DE POMPÉI

« Nous avons examiné chaque maison pour résoudre les problèmes de conservation »

Dans quel état avez-vous trouvé Pompéi lors de votre prise de fonction voici six ans ?
Catastrophique ! Des bâtiments s'effondraient chaque semaine. Pourtant, Pompéi ne souffrait pas d'un manque de moyens car nous avons toujours disposé de crédits importants mais il manquait une vision programmatique. C'est ce à quoi je me suis attelé, donnant de nouvelles responsabilités à l'équipe. J'ai ainsi réuni ouvriers, archéologues, architectes... et ingénieurs, jusqu'alors absents ! Grâce à leur expertise, nous avons examiné chaque maison pour résoudre les problèmes de conservation. Nous en avons ensuite sélectionné une trentaine déclarées « en situation critique » par l'Unesco, et nécessitant une restauration complexe du toit, des fresques ou des mosaïques. Elles ont été rouvertes depuis. Dans le même temps, nous avons repris l'entretien courant, négligé depuis vingt ans, et doublé l'équipe qui en a la charge laquelle compte désormais 100 personnes. Par ailleurs, nous avons entrepris de recenser toutes les interventions — y compris celles du passé qui se sont achevées dans les années 1950 en laissant très peu de documentations — et de les informatiser pour en conserver la trace pour les générations futures.

Quelles sont les menaces qui pèsent sur le site ?
La première est la pluie qui pose des problèmes hydrogéologiques, y compris sur les parties non fouillées, car le terrain est instable. La seconde est la fragilité intrinsèque des murs, construits avec des techniques peu élaborées. La dernière est l'affluence touristique, près de 4 millions de visiteurs en 2019 ! Pour la première fois, nous allons étudier les flux car les touristes se déplacent désormais en groupes importants. Comme il est impossible de fermer le site inscrit au Patrimoine mondial, nous avons commencé à flécher des itinéraires obligatoires afin d'éviter les dégradations dans les passages étroits comme celui de la villa des Mystères. Nous protégeons certaines œuvres avec des panneaux de verre ; nous posons des structures sur les mosaïques. Mais nous ne pouvons pas étendre ces dispositifs partout. Nous réfléchissons à placer *in situ* des copies de fresques conservées au Musée archéologique de Naples. Et il nous faut trouver encore d'autres réponses. ■

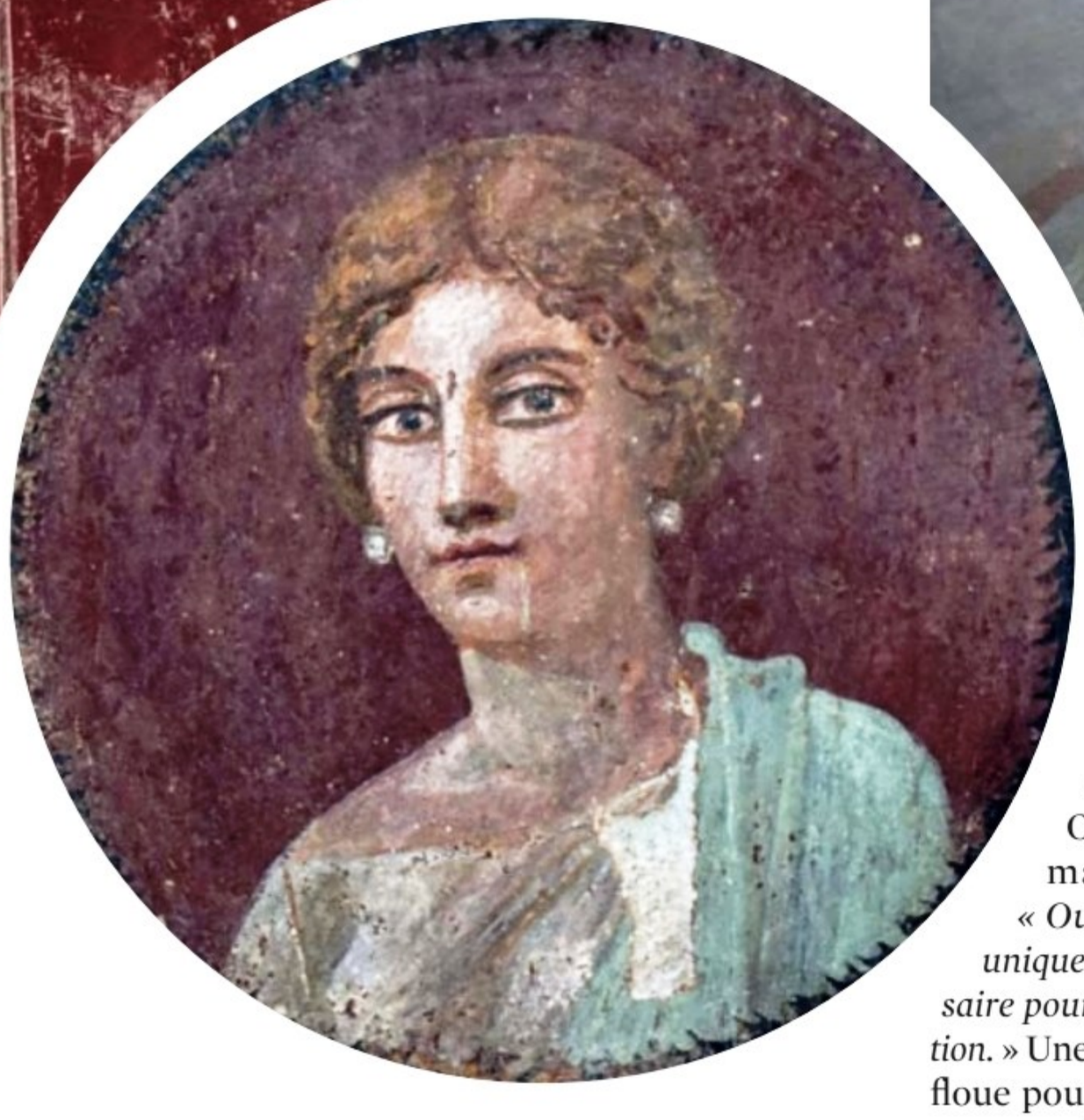
PARCO ARCHEOLOGICO DI POMPEI

PARCO ARCHEOLOGICO DI POMPEI

est incroyable. Nous sommes toujours surpris en fouillant lorsqu'apparaissent ces couleurs ! Je pense que des archéologues des siècles passés ont ressenti les mêmes émotions que nous. » Le directeur ne cache ni son émotion ni sa fierté. Pourtant, entreprendre de nouvelles fouilles n'était plus à l'ordre du jour depuis des décennies à Pompéi, ce colosse aux pieds d'argile dont les trésors déjà mis au jour au cours des siècles derniers se détériorent. Mais Massimo Osanna le jure la main sur le cœur, ce n'était pas son intention... mais uniquement une question de circonstances. Le scandale de l'effondrement en 2010 de la Schola Armaturarum (maison des Gladiateurs), aux fondations minées par les intempéries, a en effet profondément marqué l'Italie et le reste du monde. « *Cette catastrophe a finalement été une chance car elle a provoqué un électrochoc !* » assure celui qui pilote depuis 2018 le Grand Projet Pompéi doté de 130 millions d'euros de fonds italiens et surtout européens (75 %), le gouvernement de Rome ayant réinjecté 32 millions supplémentaires auxquels se rajoutent 40 millions d'euros provenant de la vente de billets d'entrée chaque année.
Une manne débloquée pour préserver le site et consolider le talus qui le surplombe : d'importants travaux de terrasse-

PARCO ARCHEOLOGIC DI POMPEI

PATRICK ZACHMANN/MAGNUM PHOTOS



CESARE ABBATO

Ce combat de gladiateurs, d'un réalisme sanglant, décorait un bâtiment de la ruelle des Balcons. Tout près de là, **cette déesse à la Lyre** assise sur un hippocampe devait distraire les clients d'un thermopolium (sorte de fast-food antique).

Le délicat portrait d'une femme (ci-dessus), peut-être la maîtresse des lieux, est peint sur un mur de la maison du Jardin (en haut).

ment ont ainsi adouci les pentes formées par le matériau volcanique et soulagé la pression exercée sur les zones déjà fouillées. Seulement voilà… comment ne pas être tenté de poursuivre les coups de truelle lorsque celles-ci dégagent la fresque de Léda, l'une des premières apparues au début des nouveaux travaux ? Aujourd'hui, Massimo Osanna le revendique malgré les critiques : *« Oui, il faut fouiller, mais uniquement là où c'est nécessaire pour le projet de conservation. »* Une nuance suffisamment floue pour qu'elle soit laissée à son appréciation. Et lorsqu'on s'étonne de voir un timide rayon de soleil frapper directement la fresque du Priape, il promet que les couvertures provisoires installées au-dessus des maisons récemment mises au jour seront remplacées par des toitures plus protectrices.

Pourtant, difficile de bouder son plaisir devant ce Pompéi inconnu qui surgit. Ainsi, la maison de Jupiter à 200 mètres de là, s'orne de décors archaïques – dits du 1er style — composés de stucs noirs, rouges ou verts imitant des marbres polychromes. Ceux-ci sont rares à Pompéi car, au moment de l'éruption, ils étaient déjà passés de mode. Au sol, dissimulées sous des bâches, deux mosaïques datant du IIe siècle avant J.-C. sont, quant à elles, stupéfiantes. *« Elles sont uniques dans le monde romain !* s'enthousiasme l'archéologue Francesco Muscolino. *Peut-être ont-elles été réalisées en Méditerranée orientale, dans l'Égypte hellénistique »*,

avance-t-il. L'une fascine par son art du détail et sa simplicité : *« Elle représente le mythe d'Orion, le chasseur grec qui voulait exterminer tous les animaux de la Terre »*, poursuit Massimo Osanna, également professeur d'archéologie classique à l'université de Naples. Un peu plus haut dans la rue, également protégé par une bâche, figure le désormais célèbre graffiti au charbon qui a confirmé ce que les spécialistes supputaient depuis longtemps : l'éruption du Vésuve, fixée jusqu'alors au 24 août, s'est en réalité produite à l'automne, le 27 octobre. L'inscription mentionne en effet *« XVI K NOV indulsit pro masumis esurit(ioni) »* (*« le seizième jour avant les calendes de novembre, il s'est bâfré »*), soit le 17 octobre. *« Certains doutent encore*, explique Francesco Muscolino, *mais cette inscription a vraisemblablement été tracée par l'un des ouvriers qui rénovaient la maison sur laquelle ils n'ont pas eu le temps de poser l'enduit. »*

PARCO ARCHEOLOGICO DI POMPEI

Cette mosaïque représentant le mythe d'Orion tué par le scorpion proviendrait de la Méditerranée orientale.

Un gigantesque puzzle d'ossements à reconstituer

Une quinzaine de squelettes ont également été exhumés lors de ces nouvelles fouilles. Ainsi celui d'un homme boiteux qui reposait, sans tête. Les archéologues ont d'abord cru qu'il avait été décapité par un bloc de granit alors qu'il tentait de fuir. Avant de retrouver son crâne intact, séparé du corps par un effondrement de terrain postérieur à la catastrophe. *« Les analyses montrent qu'il était âgé d'une quarantaine d'années, avait des dents en parfait état, et était en bonne santé hormis une inflammation du tibia »*, explique l'anthropologue Valeria Amoretti. La chercheuse, spécialiste des os, règne sur une pièce emplie de squelettes au Laboratoire des sciences appliquées du Parc archéologique de Pompéi : fémurs, côtes, phalanges, crânes... étalés sur des tables ou entassés dans des sacs. Elle s'inquiète de l'ampleur de la tâche pour reconstituer ce gigantesque puzzle : *« Je dois déterminer qui est qui car, à part quelques-uns, les os ne sont pas en connexion. Sur cette table par exemple, nous avons quatre ou cinq adultes. Étaient-ils originaires de Pompéi ; membres d'une même famille ? Les analyses ADN en cours nous donneront des réponses et j'attends également les résultats des isotopes pour déterminer leur régime alimentaire. »*

Malgré les résultats, le malaise persiste

Pour la première fois à Pompéi, les recherches emploient des compétences diverses et utilisent toutes les technologies à disposition : cartographie laser à partir de drones, thermographie infrarouge, reconstitution en 3D... créant un corpus numérique inexistant jusqu'alors. Un argument que Massimo Osanna ne manque pas d'avancer pour défendre la réouverture des fouilles : *« Nous avons compris et enregistré la dynamique de l'éruption, toutes ses phases du début avec la pluie de lapilli jusqu'aux flux pyroclastiques qui ont recouvert la ville. Nous avons également retrouvé les tunnels clandestins des pilleurs creusés avant les fouilles officielles du XVIIIe siècle. »*

Ces résultats tangibles ne suffisent cependant pas à dissiper le malaise : les fresques, fragilisées par la pollution et l'humidité, nécessitent une intervention mensuelle pour consolider les pigments. *« Nos restaurateurs doivent travailler en permanence*, reconnaît le directeur général du site. *Mais*, insiste-t-il, *en quatre ans, avec mon équipe, nous avons transformé radicalement la situation : nous sommes parvenus à faire revivre le site et l'avons sauvé ! »* À son tour, la maison de Léda a été ouverte au public cet automne. Son mandat ayant été renouvelé, Massimo Osanna prévoit désormais de s'attaquer à la Regio IX, une autre petite zone jamais fouillée... ■

POUR EN SAVOIR PLUS

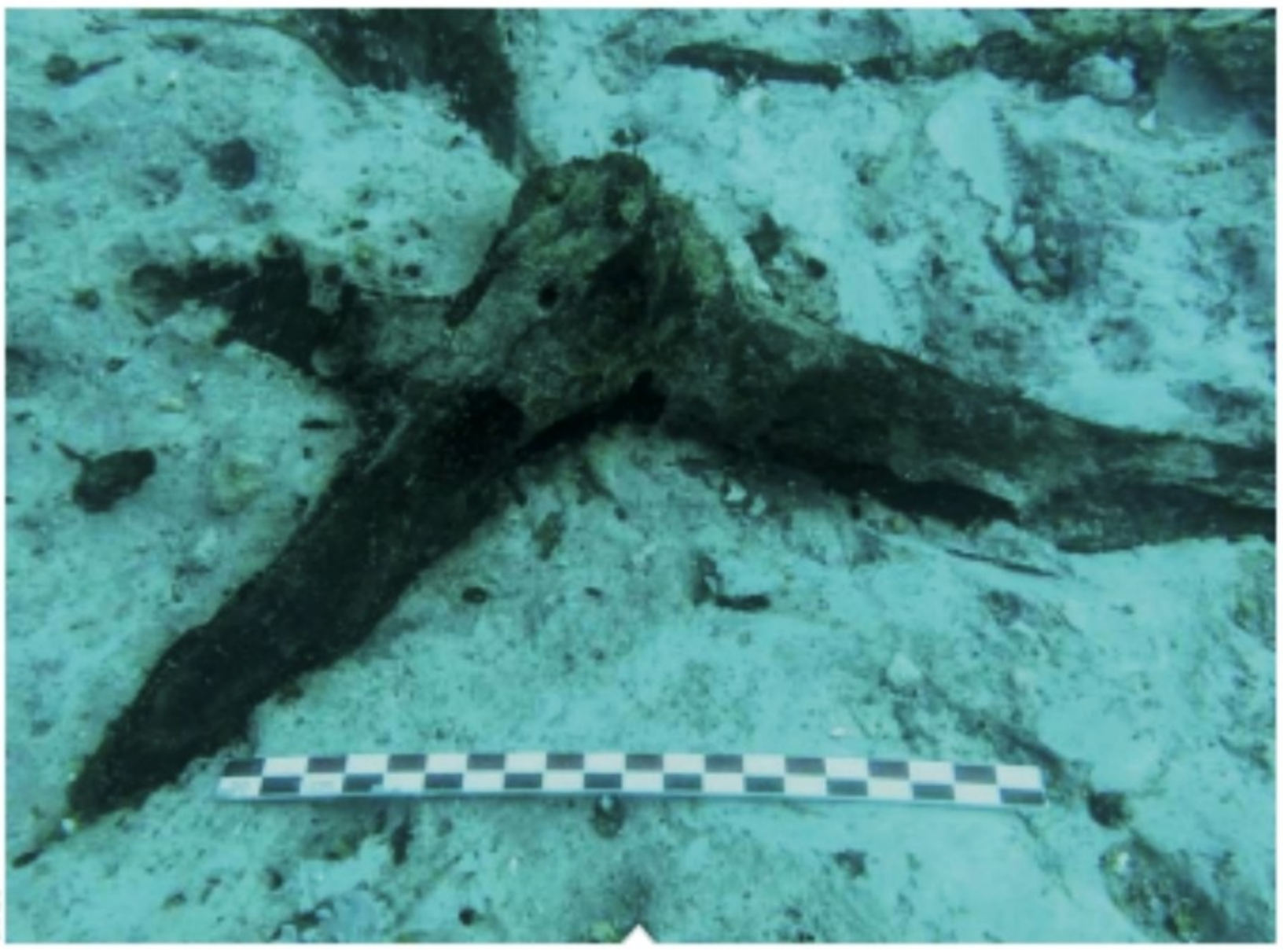
▸ **Documentaire : « Les Dernières Heures de Pompéi »,** diffusion prévue cette année sur France 5.

* Auteur des Nouvelles Heures de Pompéi, éditions Flammarion

Pour la première fois, les recherches utilisent toutes les technologies à disposition : cartographies laser réalisées à partir de drones, thermographie infrarouge, modélisation 3D

Une forêt sous la mer

Des vestiges végétaux retrouvés sous les eaux au large du littoral languedocien révèlent un paysage englouti datant d'il y a 8000 ans.



GRALL

Cette souche de chêne à feuilles caduques a conservé son système racinaire.

À UN KILOMÈTRE du trait de côte actuel, entre Palavas-les-Flots et Carnon (Hérault), des restes d'arbres ont été fortuitement repérés sous la mer. Ces témoins d'une ancienne forêt datent d'une époque où le niveau marin était situé 10 mètres plus bas qu'aujourd'hui. « *Il ne s'agit pas de troncs roulés par la houle, ni d'éléments d'épaves, mais bien de souches avec leurs systèmes racinaires* », explique Jean-Yves Jouvenel, du Groupement de recherches archéologiques du littoral languedocien (Grall). Les végétaux submergés ont pu être étudiés à la suite de campagnes de terrain menées en 2018 et 2019 sous la conduite de Marie-Pierre Jézégou, du Département des recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines, à Marseille (Bouches-du-Rhône).

Les datations au carbone 14, effectuées sur des vestiges de chênes caducifoliés (à feuilles caduques) par deux laboratoires indépendants, l'un situé aux États-Unis et l'autre en Pologne, ont livré des âges de plus de 8000 ans. À ce jour, seuls deux autres exemples de forêts noyées sont connus dans le monde. L'une, située au large de Mobile (Alabama, États-Unis), dans le golfe du Mexique, a été révélée par l'ouragan Katrina en 2005 et est datée de -50 000 ans ; l'autre, vieille de 4500 ans, a été mise au jour en 2019 dans la baie de Cardigan, au pays de Galles, par une tempête.

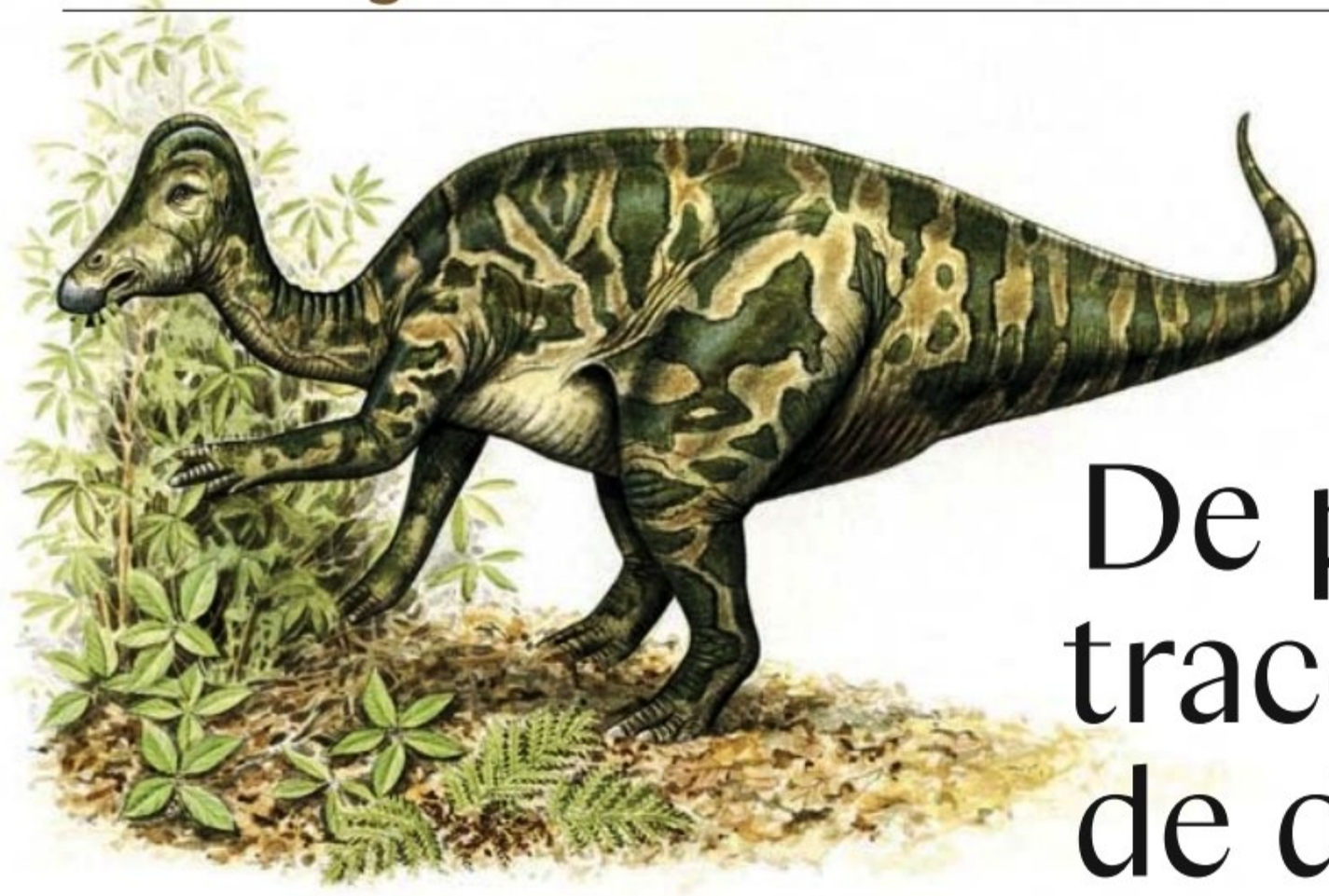
Le site de l'Hérault se trouve en lisière d'un ancien système lagunaire situé entre le cordon littoral d'alors et le continent, à l'image des « étangs », c'est-à-dire des lagunes, du littoral languedocien d'aujourd'hui comme ceux de Thau ou de Leucate-Barcarès. « *Ces découvertes exceptionnelles sont des indicateurs directs de la position du littoral tel qu'il était avant la remontée du niveau de la mer, au cours de l'holocène, la période géologique des derniers 10 000 ans*, ajoute Jean-Yves Jouvenel. *Ils constituent un marquage avéré de la localisation du trait de côte de l'époque.* »

Des tessons de poterie sur le rivage…

Ces trouvailles sont venues enrichir de précédentes découvertes effectuées au large de Palavas-les-Flots, telles qu'un alignement de blocs de calcaire, provenant de la cargaison d'un navire romain naufragé, signalé dès 1984. Ce n'est qu'en 2018, en revenant sur les lieux pour procéder à des fouilles, que les archéologues sous-marins ont aperçu les arbres à une centaine de mètres du lieu du naufrage antique.

Ces études ont permis d'élucider un autre mystère : celui des tessons de céramique dite cardiale recueillis régulièrement en bord de mer par des promeneurs au cours des dernières années. Ces poteries ornées de motifs imprimés avec de petits coquillages du genre *Cardium* — d'où leur nom — avaient dû appartenir à des populations qui vivaient près de la forêt aujourd'hui immergée. ■

Bernadette Arnaud @NarudaaArnaud



◀ **« Hypacrosaurus »,** un dinosaure à bec, est connu par des fossiles retrouvés dans l'Alberta (Canada) et le Montana (États-Unis).

De possibles traces d'ADN de dinosaure

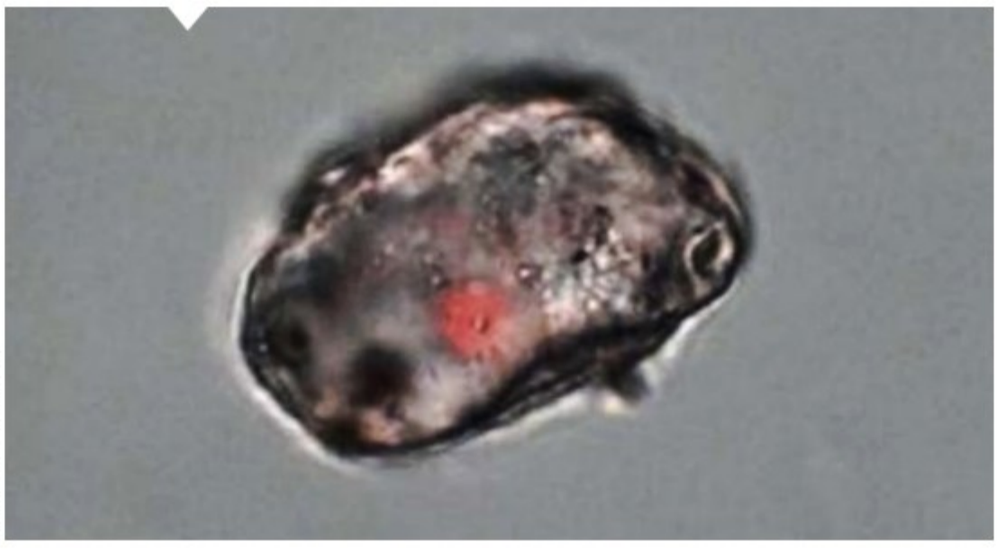
Des chercheurs auraient réussi à identifier des traces d'ADN dans le crâne d'un dinosaure vieux de 75 millions d'années. Un record!

DES CELLULES DE CARTILAGE, des protéines, des chromosomes et donc... de l'ADN vieux de 75 millions d'années. Voilà ce qui aurait été conservé chez un bébé dinosaure du genre *Hypacrosaurus*, dont les restes fossilisés ont été mis au jour dans le Montana (États-Unis) selon des chercheurs de l'Académie chinoise des sciences et de l'université de Caroline du Nord (États-Unis). Que de telles molécules aient pu persister au-delà de dizaines de millions d'années provoque un véritable choc chez les scientifiques. En effet, le plus ancien génome jamais séquencé à partir d'ADN fossile est celui d'un cheval vieux de 700 000 ans. Et selon une étude australo-danoise de 2012, l'ADN aurait une vie maximale théorique de 6,8 millions d'années, dans les meilleures conditions de conservation possibles, soit à -5 °C. Dès lors, comment interpréter cette annonce? C'est la Française Alida Bailleul, aujourd'hui à l'Institut de paléontologie et paléoanthropologie des vertébrés de Pékin (Chine), qui a réalisé les analyses microscopiques de crânes provenant d'embryons et de jeunes, alors qu'elle était en thèse à l'université du Montana. Elle se souvient de *« sa stupeur et de sa panique »* la première fois qu'elle a aperçu *« des structures en forme de cellules, certaines en division, et des points noirs évoquant les noyaux »*. Surtout, à l'intérieur de l'un d'eux, elle a discerné des *« bobines emmêlées »* ressemblant à des chromosomes.

Dix ans de travail avant de publier les résultats

Il lui aura fallu dix ans de travail et le soutien de la généticienne moléculaire Mary Schweitzer, de l'université de Caroline du Nord, pour publier ses résultats. *« Entretemps, en 2014, une équipe suédoise a annoncé avoir découvert des chromosomes et des noyaux dans une fougère fossile de -180 millions d'années; notre entreprise n'était donc pas folle »*, raconte la chercheuse.

Cette cellule de cartilage extraite d'un fossile de dinosaure montre une trace (en rouge) d'iodure de propidium, un marqueur de l'ADN.



FERRARI/STARFACE

Reste à savoir ce qui a été trouvé exactement. Pour les protéines, leur nature semble ne pas faire de doute : elles réagissent aux mêmes tests que leurs équivalents issus d'un petit émeu. Mais *quid* de l'ADN? Les substances observées réagissent bien à un colorant spécifique. Cependant, Mary Schweitzer, coauteure de l'étude, se veut prudente : *« quelque chose dans ces os est chimiquement cohérent avec de l'ADN »*, se contente de préciser la chercheuse connue pour ses découvertes — controversées — de fragments de protéines et de séquences d'acides aminés chez deux tyrannosaures et un hadrosaure.

Quand bien même il s'agirait d'ADN, cette découverte ne permet pas de rêver à *Jurassic Park*. Les fragments observés sont en effet bien trop ténus pour espérer reconstituer le génome du dinosaure. Comme le dit Beth Shapiro, biologiste moléculaire à l'université de Californie, *« c'est un peu comme si on avait découvert le mot "baleine" et qu'il fallait reconstituer le roman* Moby Dick *à partir de cela. »* Mais cela reste un mot dont l'existence était présumée impossible! ■

Rachel Mulot

@RachelFleaux

Les croisières du SAVOIR SCIENCES ET AVENIR

INSCRIVEZ-VOUS, il reste des places ! Nous espérons vivement que l'évolution de la situation sanitaire perrmettra la réalisation de cette croisière. Si ce n'était pas le cas le remboursement intégral des sommes versées est évidemment **garanti.**

ISLANDE, LE FEU, LA GLACE, LES HOMMES

DU 13 AU 21 JUIN 2020

PARIS - BRÊME REYKJAVIK - PARIS

Jour	Escales	Arrivée	Départ
13/06	Paris / Bremerhaven *(Allemagne)* ✈		15h00
14/06	En mer		
15/06	Lerwick *(Iles Shetland)*	08h00	13h00
16/06	Torshaven *(Iles Feroé)*	08h00	13h00
17/06	Seydisfjordhur *(Islande)*	13h00	18h00
18/06	Husavik *Islande)*	09h00	17h00
19/06	Isafjordhur *(Islande)*	08h00	17h00
20/06	Reykjavik *(Islande)*	08h30	nuit à quai
21/06	Reykjavik *(Islande)* / Paris ✈		-

À partir de 2.240 €

par personne en **cabine intérieure, catégorie 1** occupée par **2 personnes.**

(vols internationaux inclus, **hors excursions optionnelles et pourboires facultatifs)**

Ce prix comprend :

- La croisière à bord du M/s Berlin en pension complète du dîner du 1er jour au petit déjeuner du dernier jour, boissons aux repas incluses.
- Les vols (réguliers ou affrétés) Paris - Brême et Reykjavik-Paris.
- La présence (* sauf raison de force majeure) pendant toute la croisière, et les conférences, des scientifiques invités par Sciences et Avenir.
- Des animations de qualité chaque soir variétés, soirée classique etc.).
- L'équipe d'encadrement Plein Cap.
- Les assurances assistance rapatriement.

DOMINIQUE LEGLU
Directrice des rédactions de *Sciences et Avenir* et *La Recherche*

RÊVE DE GLACE. Les noms, à eux seuls, font rêver : Isafjordur, Husavik, Osvor... Et même celui de la capitale, Reykjavik, qui sonne comme une stalactite de glace. Avec l'Islande, mot francisé de l'Iceland (terre de glace en anglais), surgissent des images de fjords, de baleines, de geysers. Le pays souffle d'emblée le froid, le chaud et l'envie d'en savoir plus. Cela tombe bien. A bord du Ms. Berlin, aux côtés de Yves Coppens, préhistorien-parrain des Croisières du Savoir, embarqueront trois connaisseurs des trésors que recèlent ces lieux. Les fameuses sagas islandaises, que décryptera la docteure en études nordiques Gaëlle Reneteaud. Mais aussi l'océan si froid et si riche en poissons et mammifères marins, sans secret pour Gilles Boeuf, ancien directeur du Museum et ami de Sciences et Avenir. Quant aux volcans sous la glace, le Pr Jacques-Marie Bardintzeff nous en dressera un portrait saisissant. Et nous n'oublierons pas la découverte des îles Shetland et du port du dieu Thor (Torshaven) dans les îles Féroé. Vite, embarquons.

ILS SERONT AVEC VOUS PENDANT TOUTE LA CROISIÈRE *

YVES COPPENS

Paléontologue, spécialiste mondialement connu de l'évolution humaine, académicien et professeur au Collège de France. Il nous parlera du peuplement des îles que nous allons accoster, de la préhistoire aux moines irlandais et aux Vikings. Dernier ouvrage paru : *« Origines de l'Homme, origines d'un homme ».*

GAËLLE RENETEAUD

Docteur en Etudes Nordiques de l'Université Paris-Sorbonne, spécialiste de l'Islande. Elle nous dira ce que sont les *sagas* et leur place dans la culture islandaise et nous racontera le regard porté sur l'Islande dans la cartographie ancienne et les premiers récits de voyage. Dernier ouvrage paru : *« Le(s) Nord de Xavier Marmier ».*

GILLES BOEUF

Biologiste, spécialiste de la biodiversité marine et terrestre, professeur à Sorbonne-Université. il nous expliquera l'extraordinaire richesse du monde marin, ainsi que l'importance vitale pour l'humanité, mais aussi l'extrême fragilité, de la biodiversité. Dernier ouvrage paru : *« La biodiversité, de l'océan à la cité ».*

JACQUES-MARIE BARDINTZEFF

Volcanologue professeur à l'Université Paris-Sud Orsay. Il nous présentera les volcans d'Islande et leurs éruptions, les geysers et la géothermie, les paysages étonnants. Il nous expliquera comment des volcans prennent naissance au fond des océans puis émergent en îles. Dernier ouvrage paru : *« Volcanologue ».*

Avec

OLIVIER LASCAR

Rédacteur en chef du pôle digital de Sciences et Avenir

Pendant la croisière l'œil de **Lascar** restera ouvert, pertinent et... impertinent !

Une occasion exceptionnelle de larguer les amarres pour vivre neuf belles journées d'évasion entre ciel et terre. Des journées denses, rythmées par les nombreux plaisirs de la vie à bord, de passionnantes conférences et des rencontres avec des compagnons de voyage partageant les mêmes motivations et les mêmes curiosités.
Et bien sûr les excursions à la découverte de ces terres septentrionales aux somptueux paysages dont vous garderez un souvenir inoubliable !

IM006120053

RENSEIGNEMENTS ET RÉSERVATIONS : **PLEIN CAP « Croisière du Savoir »**

CROISIÈRES PLEIN CAP : **251 ROUTE DE LA COLLE - 06270 VILLENEUVE-LOUBET - info@plein-cap.com - Tél. 04 93 20 21 20**

Programme complet, renseignements et inscriptions sur le site web : croisiere-du-savoir.fr

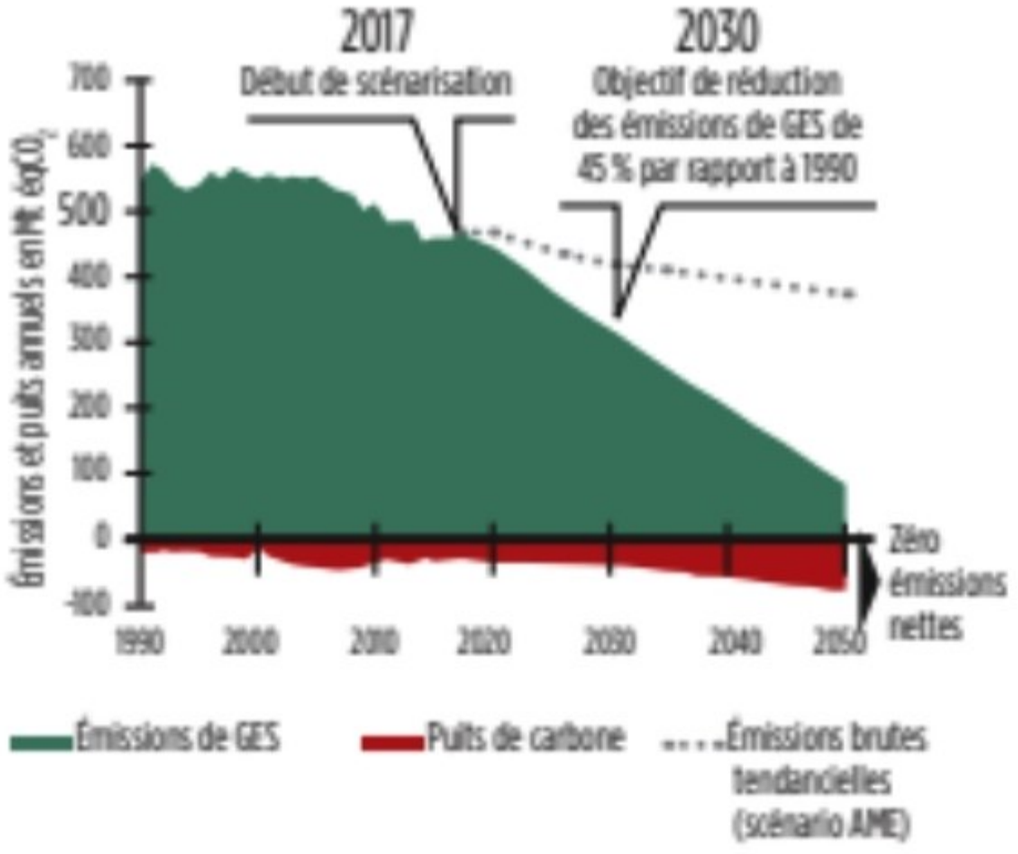
Climat : la décennie cruciale

Les émissions mondiales de CO_2 doivent, selon le Giec, chuter de 45 % d'ici à 2030, pour tenir les objectifs de l'accord de Paris de 2015. Secteur par secteur, voici les actions urgentes à entreprendre en France.

Par Loïc Chauveau @Loic_Chauveau

LA PAROLE EST AUX CITOYENS. Début avril, la Convention pour le climat, instaurée par le gouvernement en 2019 lors de la « crise des gilets jaunes », devrait rendre ses conclusions. Ses 150 membres devraient dévoiler les actions que, selon eux, la France devrait entreprendre pour diminuer ses émissions de gaz à effet de serre. Objectif : contribuer à maintenir la hausse des températures mondiales « *bien en dessous de 2 °C et si possible à 1,5 °C* » tel que le stipule l'accord de Paris signé en 2015 par 195 pays. Tirés au sort et censés être représentatifs des différentes composantes de la société, ces citoyens ont une tâche ardue : tracer pour la communauté nationale la frontière entre les efforts consentis et les sacrifices qui seraient jugés insupportables. Sans que ces actions soient inefficaces... Autant dire une gageure tant la situation est préoccupante et les décisions à prendre drastiques au vu de l'urgence climatique !

Car c'est désormais une certitude : tout va se jouer dans la décennie qui vient. Selon le rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec), qui regroupe 2000 scientifiques à travers le monde, il ne faudrait plus émettre « que » 580 milliards de tonnes de CO_2 sur la planète pour conserver 50 % de chances de rester en dessous d'un réchauffement de 1,5 °C à horizon 2100. Or, au



2010-2020 est bien une décennie « perdue » puisque les émissions de gaz à effet de serre ont très peu baissé. 2020-2030 devra rattraper le retard avec un effort de réduction de 5 à 7% par an quand une diminution d'à peine 1 % a été obtenue jusqu'ici.

RENDEZ-VOUS

2023

1er bilan national des réductions de gaz à effet de serre
(accord de Paris)

2023

Les bus neufs roulent à l'électricité ou à l'hydrogène

2024

Interdiction des véhicules Diesel et des poids lourds dans les centres urbains
(déjà décidée par Paris)

2025

Interdiction des ventes de véhicules particuliers consommant plus de 3 l/100 km

rythme actuel de 42 milliards de tonnes par an, le dépassement interviendra entre 2030 et 2052. Pour éloigner l'échéance et augmenter le sursis, le Giec a parfaitement mesuré l'effort à accomplir : les émissions mondiales doivent chuter de 45 % d'ici à 2030. Las ! l'Union européenne en général et la France en particulier dans sa « stratégie nationale bas carbone » (SNBC) sont d'ores et déjà hors des clous en proposant… 40 % de baisse à peine. « *Au vu de notre responsabilité historique de pays industriel ayant brûlé beaucoup de charbon ces deux derniers siècles, il serait juste d'être plus ambitieux* », revendique Éric Vidalenc, chef du service prospectives à l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe).

86 % des Français pensent qu'il faut agir vite

Mais malgré tous les signaux au rouge, c'est toujours l'inertie. Pour preuve, le suivi des efforts entrepris au sein de la SNBC : le premier exercice couvrant les années 2015-2018 a vu un dépassement de 65 millions de tonnes de carbone, soit un surplus moyen de 16 millions de tonnes par an. Et là où la SNBC prévoyait une diminution des émissions de 2,2 % par an, elles n'ont décru que de 1 %. Plus grave : le CO_2 est reparti à la hausse dans les secteurs du bâtiment, des transports et de l'agriculture. La situation commence cependant à inquiéter les citoyens français qui prennent conscience que laisser-faire et procrastination ne sont plus des options possibles. 86 % estiment qu'il faut agir vite « *parce que les jeunes générations l'attendent* », selon un sondage de l'institut Kantar pour le centre de réflexion Destin commun. Inondations catastrophiques, canicules et désastres agricoles interpellent même les plus sceptiques. Or, les risques de destruction de milieux naturels uniques et de survenue d'événements météo extrêmes seront beaucoup plus élevés à 2 °C qu'à 1,5 °C, affirme le Giec. Tout le ▸

2026

Fin de la construction de véhicules utilitaires Diesel ou à essence

2026

Interdiction du chauffage individuel au fioul
(3,5 millions de chaudières aujourd'hui)

MEHDI BENYEZZAR POUR SCIENCES ET AVENIR

débat se concentre donc désormais sur l'écart entre les efforts à accomplir et ceux que les citoyens sont prêts à consentir. Ainsi, côté émission de gaz à effet de serre (GES), il faudrait dégringoler de 422 millions à 300 millions de tonnes d'ici à 2030 pour ne pas dépasser 1,5 °C, soit accomplir en dix ans ce que le pays a mis trente ans à réaliser. Encore ne s'agit-il là que de chiffres nationaux. Il faudrait y ajouter les émissions dites importées, c'est-à-dire la consommation énergétique qu'il a fallu dépenser pour fabriquer les produits que nous faisons venir de l'étranger, et notamment de Chine où le charbon est roi. Le « budget carbone » devrait alors s'établir à… moins de 100 millions de tonnes.

Une vraie révolution énergétique, industrielle, économique et sociale… que les instances nationales tardent à lancer. Les associations réunies au sein du Réseau action climat (RAC) ont ainsi failli s'étrangler en prenant connaissance du plan de la SNBC adopté cette année pour les trois ans qui viennent : une poursuite du dépassement constaté dans la période précédente, au prétexte que les mauvaises tendances des secteurs du bâtiment, des transports ou de l'agriculture ne peuvent être corrigées immédiatement. Ce

2027

Fin des importations de soja américain

2027

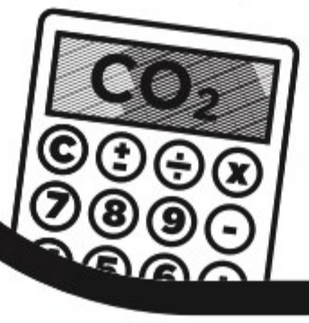
Suppression des lignes aériennes intérieures et doublement du nombre de trains

RENDEZ-VOUS

2028

1er bilan national de cinq ans d'action

(accord de Paris)



2029

Interdiction de la construction de maisons individuelles

2028

40 % de la chaleur est d'origine renouvelable

(moins de 20 % aujourd'hui)

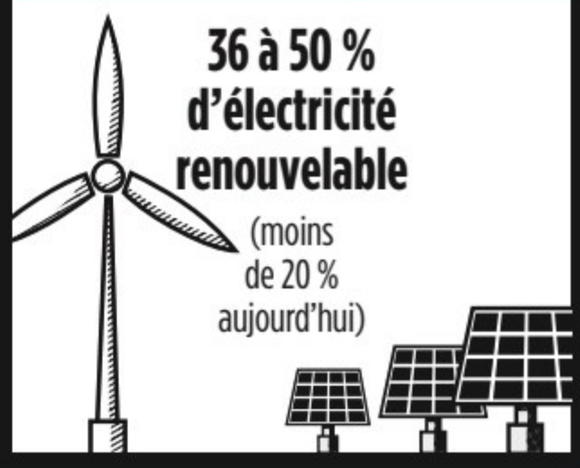
et **10 %** de biogaz

(1 % aujourd'hui)

2028

36 à 50 % d'électricité renouvelable

(moins de 20 % aujourd'hui)



2028

Rythme de conversion des terres en bio porté à 1 million d'hectares par an

n'est qu'à partir de 2 024 que des mesures supplémentaires seront envisagées pour revenir « dans les clous ». « *C'est dès aujourd'hui qu'il faut accentuer les efforts pour les rendre plus réguliers et plus supportables sur la durée* », dénonce le RAC.

Réorienter ses choix de consommation

Les mesures qui devraient être prises sont douloureuses, tant pour les finances du pays que pour les modes de vie. Le bureau d'études B&L, qui accompagne les entreprises et les collectivités dans la rédaction de leurs bilans carbone, s'est risqué à les imaginer. « *Ces actions profondes s'apparentent à une économie de guerre*, assure Charles Adrien Louis, président de B&L. *Avec, par exemple, le recrutement et la formation de 50 000 artisans du bâtiment par an pour arriver à rénover énergétiquement annuellement 700 000 logements, la mutation accélérée de l'agriculture vers l'agroécologie, la diminution drastique des besoins en déplacements, la conversion en quelques années du parc automobile vers l'électrique.* » *(Voir l'infographie.)*

Se pose dès lors la question à laquelle sont confrontés les 150 citoyens de la Convention pour le climat : doit-on imposer ces mesures quand la bonne volonté et les déclarations d'intention ne suffisent, à l'évidence, pas ? En témoignent les évolutions récentes du marché de l'automobile. En 2008, les constructeurs ont accepté, conformément au règlement européen, de limiter les émissions de CO_2 de leur véhicule à 95 grammes par kilomètre en 2020. Or, la moyenne actuelle est à… 110 grammes, en dépit de la pénalité de 95 euros par gramme de dépassement pour chaque voiture vendue prévue à partir du 1er janvier 2021. L'échec porte un nom : les SUV (*sport utility vehicles*) qui captent jusqu'à 70 % du marché. À qui la faute ? Aux constructeurs qui inondent les écrans de publicités pour ces modèles gourmands ? Ou aux consommateurs qui oublient le désastre climatique une fois au volant ?

Même constat pour les logements dont la superficie moyenne n'a cessé d'augmenter, si bien qu'aujourd'hui chaque Français bénéficie en moyenne de 40 m², ce qui artificialise les sols et fait exploser les dépenses de chauffage. B&L envisage ainsi un abaissement à 32 m², tout comme il préconise une diminution des téléviseurs taille XXL et une réduction des achats de vêtements neufs qui représentent 10 kg par an et par personne soit… 40 pièces ! D'autres mesures sont encore plus drastiques comme celle qui impose une consommation quotidienne d'électricité de 2 kWh contre 4 aujourd'hui, en mutualisant les machines à laver ou en réduisant les points d'éclairage. « *La catastrophe climatique n'est pas inéluctable, nous avons tout pour l'éviter tant par de nouvelles techniques que par des changements de mode de vie. Une bonne partie de la solution tient dans la réorientation de nos choix de consommation* », assure Éric Vidalenc qui chapeaute un programme détaillant les flux de matières nécessaires au fonctionnement de la société française dont les conclusions seront rendues en 2021. La Convention citoyenne pour le climat ira-t-elle dans ce sens ? ■

Deepwater Horizon : les leçons manquées de la catastrophe

Dix ans après l'explosion de la plate-forme pétrolière Deepwater Horizon dans le golfe du Mexique en raison de défaillances, les études montrent que le bilan a été minoré et les pratiques largement inchangées.

L'ampleur de la catastrophe a été sous-estimée de 30 %

Totalement dépassée ! L'étude de référence de l'université de Floride (États-Unis), réalisée en 2015, a sous-évalué l'étendue du désastre… d'un tiers. Pourtant, les chiffres qu'elle présentait faisaient déjà froid dans le dos : 795 millions de litres de pétrole remontés du sous-sol océanique après l'explosion de la plate-forme (contre 269 millions déversés par le supertanker *Amoco Cadiz* en Bretagne en 1978) et 149 000 km² pollués, soit plus du quart de la superficie de la France. Mais un travail des universités américaines de Miami et de Géorgie paru en février 2020 dans *Science Advances* estime l'étendue du désastre bien supérieure. En cause : des données initiales incomplètes.

« *Les satellites ne détectent pas le pétrole en deçà de certaines concentrations pourtant toxiques* », souligne l'océanologue Igal Berenshtein, premier auteur de cette étude. Et de nouvelles modélisations montrent que les rejets d'hydrocarbures peuvent être acheminés en profondeur dans l'océan avant de dériver selon des courants très différents de ceux observés en surface. Résultat : ce sont 193 000 km² au moins qui auraient été souillés. Autre phénomène négligé : la toxicité des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sur les organismes marins (poissons, invertébrés, plantes). Celle-ci est en effet accrue d'un facteur 100 en présence d'ultraviolets. « *Nos résultats montrent que de l'"huile" toxique et invisible peut se propager à des concentrations potentiellement mortelles pour de nombreuses espèces* », souligne Claire Paris, professeure de sciences de l'océan à l'université de Miami (États-Unis), et coauteure de l'étude.

▲ **Plus de 2000 kilomètres** de côtes ont été souillés le long de cinq États américains riverains du golfe du Mexique.

BRUNO BOURGEOIS

Le nettoyage a été désastreux

Selon les autorités américaines, entre 70 et 80 % du pétrole brut répandu aurait disparu par brûlage, évaporation ou dispersion. Ce qui en laisse encore entre 159 millions et 238,5 millions de litres dans la nature. *A minima* ! Car le nettoyage aurait été largement inefficace, à en croire des expériences menées par l'université de Géorgie (2015). 7 à 9,5 millions de litres de dispersants chimiques (Corexit, produit par Ecolab, associé à BP) auraient été déversés par avion ou injectés sous l'eau à la tête du puits qui fuyait. Mais ils auraient nettoyé l'eau en surface… pas en profondeur. De sorte qu'« *un pétrole noir et lourd tapisse désormais une bonne partie des fonds du golfe du Mexique* », explique Samantha Joye, qui a testé en laboratoire l'effet de différents dispersants sur 50 000 bactéries.

La chercheuse avait plongé dès 2011 en sous-marin à 20 kilomètres de la plate-forme Deepwater et à 1600 m de profondeur, pour découvrir, consternée, « *un tapis huileux de 7000 km², jonché d'organismes morts et de coraux enduits d'une vase noirâtre* ». Contestée par des scientifiques du gouvernement et des compagnies pétrolières, elle s'était ensuite ruée sur sa paillasse pour comprendre le phénomène en cause. Selon ses travaux, les dispersants utilisés par BP favorisent la prolifération de micro-organismes (Collwellia) qui « effilochent » le pétrole, le rendant ingérable par la faune sous-marine. Ils limitent aussi drastiquement le développement d'une bactérie (*Marinobacter*) qui se nourrit naturellement des produits pétroliers. Ses résultats ont été transmis à l'Agence américaine pour la protection de l'environnement (EPA). Sans effet.

CONTEXTE

La catastrophe survenue il y a dix ans dans le golfe du Mexique n'a pas découragé l'industrie. Les forages ultraprofonds, qui vont chercher le pétrole à plus de 1500 mètres de profondeur dans l'océan puis à plus de 4000 mètres sous les sédiments marins, sont de plus en plus fréquents. Marginaux dans les années 1970, ils fournissent aujourd'hui plus du quart de la production pétrolière mondiale et représentent une part croissante des 120 000 forages réalisés chaque année dans le monde. (Source : IFPEN/ Mines ParisTech.)

L'explosion de la plate-forme pétrolière, le 20 avril 2010, au large des États-Unis, avait entraîné 87 jours de fuite d'hydrocarbures depuis un puits à -4000 m.

AFP PHOTO/US COAST GUARD

À ce jour, le produit n'est toujours pas proscrit en dépit d'une étude mexico-américaine (2013) qui montre que, combiné au pétrole, il dévaste des organismes piliers du zooplancton. Pis, le Canada l'a autorisé en 2016, malgré un rapport négatif de l'université du Québec à Rimouski et en dépit des protestations de plusieurs chercheurs canadiens qui se sont heurtés au refus du fabricant de fournir des échantillons tests.

Les innovations technologiques ne sont pas fiables

Les obturateurs anti-éruption, considérés comme la dernière ligne de défense contre un déversement catastrophique, ne sont toujours pas fiables, estime l'ONG Oceana, la plus grande association internationale dédiée à la protection des océans. Or c'est ce dispositif qui s'était montré défaillant en 2010 lorsque les opérateurs de Deepwater avaient tenté de l'activer pour juguler les flots de pétrole issus du puits. Malgré cet échec, ces obturateurs ne sont toujours pas testés dans des conditions reproduisant l'environnement extrême auxquels ils sont exposés.

Les contrôles sont inopérants

La commission d'enquête mise en place après la catastrophe par l'administration Obama a formulé 30 recommandations visant notamment à améliorer la ▸

UNIVERSITY OF MIAMI

« Du brut toxique et invisible peut se propager à des doses mortelles pour de nombreuses espèces »

Claire Paris, professeure de sciences de l'océan à l'université de Miami (Floride, États-Unis).

ÉCOSYSTÈME

Une faune et une flore durablement meurtries

Pourra-t-on jamais restaurer l'écosystème ravagé par les nappes de pétrole de la plate-forme accidentée Deepwater Horizon exploitée par BP dans le golfe du Mexique ? Les bilans dressés par plusieurs universités en 2016 puis en 2017 par la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) américaine sont sombres. Selon ces 22 études, le mazoutage a contaminé, en surface comme en profondeur, des sites vitaux d'alimentation, de migration et de reproduction. Les mangroves et les marais salants sont englués ; la disparition de certaines plantes accélère l'érosion des côtes ; les prairies sous-marines où vivent les lamantins sont asphyxiées ; les estuaires sont pollués tout comme les eaux fréquentées par les baleines ; l'exposition au pétrole brut a entraîné des pathologies et une défaillance de la reproduction. Résultat : le golfe du Mexique connaît *« l'épisode de mortalité le plus important et le plus long jamais enregistré chez les mammifères marins dans cette zone »*, pour chacune des 22 espèces protégées, selon la NOAA. Les populations de grands dauphins ont ainsi chuté de 50 % en Louisiane, de 62 % au Mississippi. Plus de 167 000 tortues de mer ont par ailleurs péri, et la mortalité juvénile a crû de 20 % chez les tortues de Kemp. Il faudra encore des années pour espérer un retour à la normale, d'autant que les forages profonds reprennent de plus belle *(lire ci-contre)*.

NOAA AND GEORGIA DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES

Plus de 167 000 tortues de mer ont péri des suites de la catastrophe.

▶ sécurité et à protéger l'environnement. *« Peu d'entre elles ont été mises en œuvre »*, regrette Richard G. Steiner, ancien professeur de conservation marine à l'université d'Alaska (États-Unis), aujourd'hui consultant. *Après avoir effectué des réformes cosmétiques, le Congrès a laissé les pétroliers aux manettes. Et l'administration a vite fait pression pour reprendre les forages* offshore. » Les entreprises du secteur assurent avoir amélioré leurs pratiques, mais le nombre d'inspecteurs pour le vérifier est ridicule aux États-Unis : 120 pour 20 000 visites annuelles nécessaires. Pourtant, c'est dans ce pays que se produisent le plus grand nombre d'accidents et de fuites selon Oceana : plus de 6500 fuites entre 2007 et 2017. Le taux de mortalité chez les ouvriers serait 4 fois supérieur à celui observé dans les compagnies pétrolières européennes et 7 fois supérieur à celui des autres ouvriers américains. *« La culture de la sécurité n'a pas évolué*, pointe Diane Hoskins, d'Oceana. *Le Bureau of Safety and Environmental Enforcement (BSEE) s'appuie sur les normes écrites par et pour l'industrie et n'assure pas de surveillance adéquate, De surcroît, il accorde régulièrement des dérogations aux obligations de sécurité. »*

Les amendes sont peu dissuasives

Certes, BP a été condamné à payer une amende record de 20,8 milliards de dollars (18,2 milliards d'euros). Mais les sanctions pour violation des obligations de sécurité continuent à peser très peu dans le budget des forages en mer. Aux États-Unis, elles sont plafonnées à 44 675 dollars (39 300 euros) par jour, alors que les coûts d'exploitation peuvent atteindre plus de 1 million de dollars, selon le Congrès américain.

Les règles des forages profonds vont être assouplies

Les forages ultraprofonds ont à nouveau le vent en poupe. BP Canada a été autorisé en 2018 par le gouvernement d'Ottawa (Canada) à lancer un forage en haute mer, au large de la Nouvelle-Écosse, à près de 3000 m de profondeur, soit le double de la profondeur du forage exploratoire qui a mené à la catastrophe de Deepwater Horizon. De son côté, l'administration Trump veut détricoter d'ici à quelques mois les textes qui régulent les forages profonds en haute mer et les autoriser dans presque toutes les eaux américaines. Fini le contrôle des puits, même sporadique, par des autorités indépendantes. Et fini la surveillance des installations *offshore* en temps réel par des moniteurs à terre. Objectif : faire économiser 824 millions de dollars (723 millions d'euros) à l'industrie pétrolière et gazière offshore en 10 ans, selon le calcul du BSEE. Un calcul à courte vue : la catastrophe de Deepwater Horizon a coûté 61,5 milliards à BP. ■

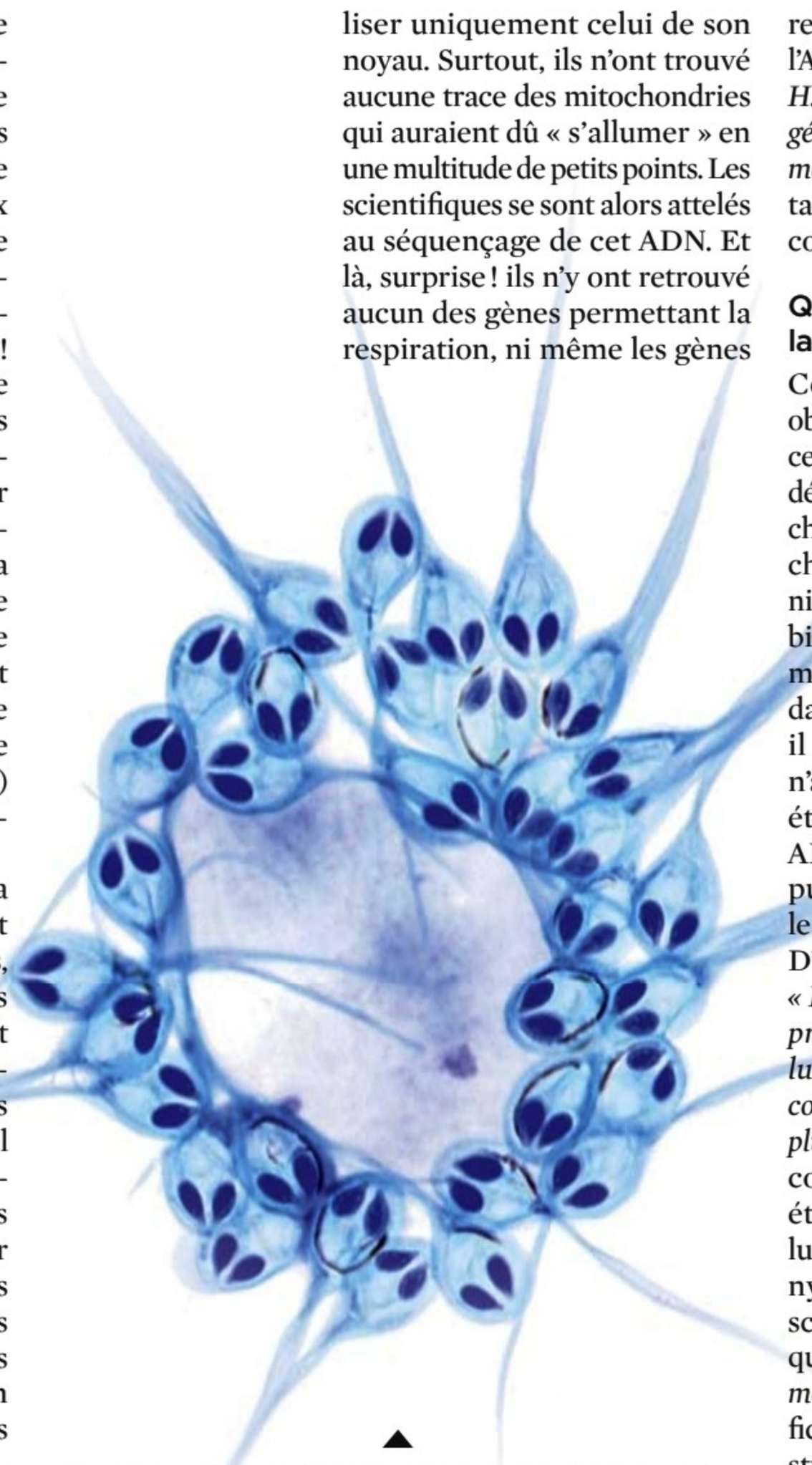
Rachel Mulot @RachelFleaux

Le premier animal qui n'a pas besoin d'oxygène

« Henneguya salminicola » est un parasite qui a une particularité : contrairement à ses plus proches cousins connus, il ne possède aucun des « outils » nécessaires à l'utilisation de l'oxygène.

LES ANIMAUX — dont l'être humain — ont besoin d'oxygène pour vivre. Voici le dogme qui vient de voler en éclats avec *Henneguya salminicola*. Ce parasite qui vit notamment aux dépens de poissons comme le saumon royal, est le premier animal connu à vivre sans avoir nullement besoin de ce gaz. Mieux ! n'en ayant plus l'utilité, il a même perdu l'ADN qui contenait les gènes nécessaires à son utilisation. Une perte compensée par l'acquisition d'enzymes permettant la production d'énergie à la manière des levures, c'est-à-dire en transformant une molécule issue du glucose (pyruvate). Et ce, toujours sans oxygène, comme le rapportent les chercheurs de l'université de Tel-Aviv (Israël) en collaboration avec des collègues américains et français.

H. salminicola est un membre de la famille des myxozoaires, qui font eux-mêmes partie des cnidaires, un groupe d'animaux aquatiques marins comprenant notamment les méduses. Comme tout animal, il est constitué de cellules contenant un noyau dans lequel se trouve de l'ADN (cellules eucaryotes). Normalement, ces cellules devraient également contenir du matériel génétique dans les mitochondries, petites centrales énergétiques où se déroulent les réactions énergétiques. Or, en cherchant à marquer l'ADN des cellules du parasite, les chercheurs sont parvenus à visualiser uniquement celui de son noyau. Surtout, ils n'ont trouvé aucune trace des mitochondries qui auraient dû « s'allumer » en une multitude de petits points. Les scientifiques se sont alors attelés au séquençage de cet ADN. Et là, surprise ! ils n'y ont retrouvé aucun des gènes permettant la respiration, ni même les gènes responsables de la réplication de l'ADN mitochondrial. Conclusion : *H. salminicola* a perdu *« à la fois son génome mitochondrial et ses voies métaboliques aérobies »* [permettant l'exploitation de l'oxygène], concluent les chercheurs.



STEPHEN DOUGLAS ATKINSON

« H. salminicola » se reproduit grâce à des spores *(ci-dessus)* qui se développent au sein des poissons qu'il parasite.

Quand l'évolution choisit la simplification

Ce phénomène avait déjà été observé chez des organismes unicellulaires vivant dans des milieux dépourvus d'oxygène, mais jamais chez un animal. En 2010, des chercheurs de l'Université polytechnique des Marches (Italie) avaient bien trouvé des organismes animaux de la famille des loricifères dans des sédiments marins, là où il n'y a pas d'oxygène. Mais ils n'avaient pas pu prouver qu'ils étaient vivants. Et les données ADN n'ont jamais été rendues publiques par l'équipe, laissant le doute planer sur la découverte. D'où l'intérêt de *H. salminicola*. *« La perte de gènes superflus confère probablement un avantage évolutif, car il a été démontré que le coût bioénergétique d'un gène est plus élevé dans les petits génomes »*, commentent les auteurs. Leur étude confirme ainsi que l'évolution n'est pas forcément synonyme de complexification. Les scientifiques y voient la preuve que *« moins, c'est plus »* (*« less is more »*). Comprendre : la simplification peut être la meilleure des stratégies. ■

Camille Gaubert

@CamilleGaubertb

LES DÉFIS du coronavirus

La guerre contre une pandémie inédite est lancée. À l'instar de la France, de nombreux pays ont choisi le confinement massif des populations pour enrayer la propagation de ce virus émergent. Le point sur la recherche de traitement et de vaccin.

NOTRE TOUT PREMIER article sur le coronavirus, paru sur notre site Internet le 8 janvier, s'intitulait « Un virus d'origine inconnu inquiète la Chine ». On sait ce qu'il advint. À l'heure où nous écrivons ces lignes, une grande partie de la planète est entrée en guerre contre le Sras-CoV-2, en particulier l'Europe qui fait face à une pandémie inédite. La date du 17 mars restera d'ailleurs gravée dans les mémoires : le premier jour du confinement de la France. Appliquant des stratégies différentes — dépistage massif en Corée du Sud ; confinement total en Chine, Italie, Espagne, France… ; moindre intervention au Royaume-Uni — la plupart des pays ont cependant opté pour le *freezing* : autrement dit s'immobiliser pour ne plus être repéré par le prédateur et stopper ainsi sa course folle. Le temps pour les autorités sanitaires d'être en capacité de sauver celles qui, parmi les personnes infectées, ont contracté une forme grave de Covid-19 *(lire ci-dessous et p. 72)*. Le temps aussi pour la recherche mondiale, totalement mobilisée, de mieux décrypter l'ennemi et trouver une parade *(lire p. 68)*… et tenter ainsi d'infléchir coûte que coûte les courbes de projection aux prévisions dramatiques. Si la guerre est collective, la responsabilité de chacun d'entre nous est engagée. ■ **Carole Chatelain** @carolechatelain

LA PANDÉMIE

17/11/19
▸ 1ers cas d'infections par Sras-CoV-2 dans le Hubei (Chine).

31/12/19
▸ Déclaration officielle de l'épidémie par les autorités chinoises.

23/01/20
▸ Mise en quarantaine de millions de Chinois.

24/01/20
▸ Deux premiers cas confirmés en France.

28/02/20
▸ Plusieurs foyers épidémiques se révèlent, la France passe en stade 2.

08/03/20
▸ Plus de 1000 cas en France.

11/03/20
▸ Déclaration de la pandémie par l'OMS.

17/03/20
▸ 4500 cas confirmés, stade 3 : confinement général en France.

Une infection particulièrement furtive

Quels sont les rouages de cette pathologie longtemps asymptomatique ? Comment la maladie affecte-t-elle les poumons ? Éléments de réponse.

L'ARME LA PLUS DANGEREUSE d'un pathogène est parfois de ne pas déclencher de symptômes. C'est ce que rappelle l'émergence du Sras-CoV-2 à l'origine de la pandémie de Covid-19. À l'heure où nous écrivons, 35 à 50 % des personnes infectées ne présenteraient pas ou peu de symptômes tout en étant potentiellement aussi contagieuses que celles qui en ont. Lesquelles peuvent transmettre le virus durant la période d'incubation, de 5 à 6 jours en moyenne. Et beaucoup n'ont pas été détectées ! D'une part parce que 81 % des cas symptomatiques sont bénins (fièvre et toux) et n'appellent pas nécessairement une consultation ; d'autre part en raison de l'absence de dépistage systématique à très grande échelle. Autant de facteurs pour une diffusion silencieuse. Passé un certain point, l'épidémie a ainsi déclenché un afflux soudain de patients atteints de formes sérieuses. Selon une étude chinoise portant sur 72 000 cas, 19 % des malades présentent des formes sévères (14 %) ou critiques

DÉVELOPPEMENT DE LA MALADIE (TEMPS MOYENS)

JOUR 1 Contact infectieux : des millions de virions pénètrent l'organisme par les cellules des muqueuses et s'y répliquent (nez, bouche, yeux…).

J 2-3 La personne infectée devient contagieuse. Les virions se multiplient par milliards et migrent vers les poumons.

J 5-6 Apparition des premiers symptômes : toux, fièvre, fatigue…

J 12-15 Amélioration ou aggravation rapide en détresse respiratoire voire en syndrome respiratoire aigu sévère (Sras).

J 15-60 Amélioration ou décès par asphyxie, choc septique ou défaillance des organes vitaux.

J 20 fin de contagiosité chez les survivants (moyenne).

FEATURE CHINA/BARCROFT MEDIA VIA GETTY IMAGES

La mise sous assistance respiratoire permet de combattre les symptômes et aider l'organisme du malade à prendre le dessus sur l'infection (ici à Wuhan, en Chine, le 1er mars.)

(5 %). En plus des symptômes courants (fièvre, toux grasse ou sèche, etc.) ceux-là vont rencontrer des difficultés respiratoires, allant jusqu'au syndrome respiratoire aigu sévère (Sras), déjà rencontré lors de l'épidémie de Sras-CoV en 2002-2003. Le risque augmente avec l'âge et les pathologies associées (maladies cardiaques, hypertension, diabète, etc.). Il est trop tôt pour dire quelle proportion des 30 à 60 ans est touchée par des formes graves, mais il y en a. Passé 70 ans, la mortalité est de 8 % ; après 80 ans, de 14,8 %, toujours selon l'étude chinoise de référence.

Lorsque les symptômes se manifestent, le virus a déjà altéré le revêtement des bronches et des poumons en détruisant les cellules dans lesquelles il se multiplie ; il est alors repéré par le système immunitaire qui déclenche l'inflammation pour le combattre. Le patient est placé sous oxygène ou aidé par un appareillage de ventilation artificielle. Dans certains cas, un lourd disposi-

tif nommé « oxygénation par membrane extracorporelle » (ECMO) permet de prendre en charge l'oxygénation du sang et la continuité du rythme cardiaque. Une technique de pointe, la France disposant de moins de 500 machines. Pour le reste, le pays dispose de 7364 lits dans les unités de soins intensifs et de 5000 lits en réanimation, selon la Direction générale de la santé.

Tout dépend de l'afflux dans les hôpitaux

Radiographie, voire scanner, des poumons, rythme cardiaque, fréquence respiratoire, taux d'oxygénation du sang... le patient sévère ou critique est monitoré. Mais quand, la pneumonie à Sras-CoV-2 dégénère en syndrome respiratoire aigu sévère, celui-ci entraîne la destruction des alvéoles et un œdème. À ce stade, la mortalité est de 30 à 50 %. Trouver des traitements efficaces est essentiel pour améliorer le pronostic *(lire ci-contre)*. Car même ventilé artificiellement, le patient finit par être victime de son propre organisme : le système immunitaire largue en trop grande quantité les protéines (cytokines) ciblant l'agent pathogène. Cette « tempête cytokinique » se propage dans le système sanguin et peut conduire à la défaillance d'organes vitaux (foie, reins, cœur, pancréas).

In fine, le taux de létalité de Covid-19 dépend presque entièrement du nombre de malades qui affluent dans les hôpitaux et donc de la part de population infectée simultanément. À l'heure où nous écrivons ces lignes, l'Italie, débordée, enregistre un taux de 7,7 %, contre seulement 0,2 % en Allemagne ou 0,9 % en Corée du Sud... et 2,2 % en France. ■

Hugo Jalinière @hugojalinière

Course éperdue pour trouver le remède efficace

Plusieurs stratégies sont envisagées concernant les traitements et notamment l'utilisation d'antiviraux déjà existants.

La guerre déclarée au Sras-CoV-2 ne peut pas se mener sans armes. Les soins d'urgence se doublent d'une recherche active pour trouver des traitements chimiques ciblant l'infection elle-même. Une offensive à deux volets pour permettre dès que possible d'améliorer le pronostic des cas graves, soit 20 % des cas confirmés en moyenne à l'heure où nous écrivons ces lignes. Mais aussi d'accélérer la guérison et alléger ainsi plus vite les services de soins. Plusieurs stratégies sont envisagées concernant les traitements, à commencer par l'utilisation d'antiviraux déjà existants.

C'est le cas du remdesivir, développé sans succès contre Ebola par le laboratoire Gilead, et qui apparaît aujourd'hui la piste la plus prometteuse contre le Sras-CoV-2. Il agit en modifiant les protéines à la surface des cellules ciblées par le virus, court-circuitant ainsi la réplication des virions. C'est une *« petite molécule capable de gagner l'ensemble des compartiments de l'organisme et dont on sait qu'elle diffuse parfaitement dans les poumons, organe cible de la maladie*, indique le Pr Denis Malvy, responsable de l'unité Maladies tropicales et du voyageur au CHU de Bordeaux. *C'est aujourd'hui le candidat le plus probant.* » Très utilisé de façon expérimentale en Chine, il a pu faire l'objet d'un essai clinique dit de phase trois sur 760 patients dans ce pays, dont les résultats sont attendus le 27 avril. Ce type d'essais, réalisé contre placebo, en double aveugle est le seul moyen d'établir des preuves solides de la meilleure prise en charge possible. Ils permettent de comparer l'efficacité de différents traitements selon l'état initial du malade.

AFP

« L'antiviral remdesivir est aujourd'hui le candidat médicament le plus probant »
Pr Denis Malvy, responsable de l'unité Maladies tropicales et du voyageur au CHU de Bordeaux

En Europe, 3200 patients, dont 800 en France, ont été recrutés pour comparer quatre stratégies en formant plusieurs groupes : la prise en charge classique seule (soins, assistance respiratoire), ou associée au remdesivir, ou encore au Kaledra, un antirétroviral utilisé contre le VIH et constitué d'une association de deux molécules (lopinavir et ritonavir). Ici, c'est la production de protéines et d'enzymes par les virions qui est inhibée, ce qui bloquerait la propagation du virus dans les tissus. La dernière approche consiste à associer des « interférons bêta » au Kaledra, des molécules produites par le système immunitaire pour améliorer la résistance des cellules à l'infection. Sur le plan expérimental, ce sont ces stratégies qui ont été utilisées avec le plus de succès.

La piste de la chloroquine explorée

Devant l'urgence et l'afflux de malades, d'autres essais ont été annoncés, parfois à grand bruit. Ainsi de la chloroquine, cet antipaludéen utilisé depuis soixante ans qui est régulièrement évoqué pour ses propriétés antivirales indirectes à chaque épidémie de virus émergent (Sras, Ebola, Mers). Pour la première fois cependant,

IMMUNOLOGIE

Le vaccin, pour confiner le virus

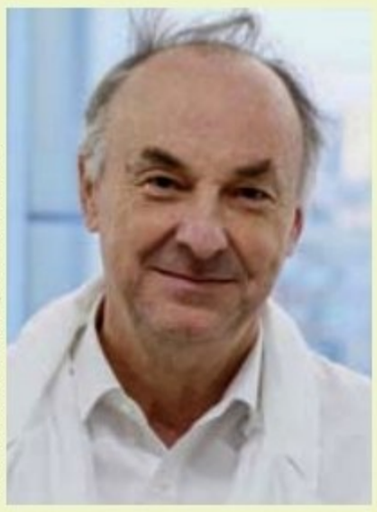
Tous les spécialistes sont d'accord : aucun vaccin ne sera prêt avant au moins 12 à 18 mois, soit au mieux au printemps 2021. Si la conception du vaccin lui-même peut être rapide, il n'en est pas de même de sa validation sur des critères de sécurité, d'efficacité et de la balance dite bénéfice-risque. De longues étapes, mais strictement indispensables. Le 16 mars, les 45 participants à un essai clinique américain dit de phase 1 (premiers essais sur l'humain) ont reçu les doses d'un candidat-vaccin développé par la start-up Moderna. La Chine a elle aussi commencé à tester sa formule. En tout une trentaine de candidats-vaccins sont en développement et une dizaine d'essais devraient être lancés dans le monde d'ici au début de l'automne prochain, parmi lesquelles la formule de l'Institut Pasteur, en France, à partir de septembre. Leur réussite sera le seul moyen fiable de confiner le virus, comme c'est déjà le cas pour celui de la grippe. Même imparfait, le vaccin confère une immunité de groupe qui empêche l'agent pathogène de circuler. **H. J.**

À l'Institut Pasteur, à Paris, préparation de cultures ensemencées par le virus de la rougeole dans lequel a été inséré du matériel génétique du Sras-CoV-2.

CHRISTOPHE LEHENAFF

en Chine, en Italie ou en France (Marseille et Paris), la chloroquine a été testée chez des patients, et non plus seulement en laboratoire. Les données sont encore parcellaires, le médicament peut devenir mortel s'il est mal dosé, mais cette piste n'a peut-être pas dit son dernier mot.

Par ailleurs, fin mars, les géants pharmaceutiques Sanofi et Regeneron ont lancé un essai clinique pour repositionner leur traitement contre la polyarthrite rhumatoïde (PR) sur le Covid-19 : le Kevzara est un anticorps cloné en laboratoire et administré pour son action anti-inflammatoire. À Naples (Italie), c'est le tocilizumab — également indiqué contre la polyarthrite — qui est testé. Le but étant dans les deux cas de permettre à l'organisme d'atténuer la tempête immunitaire toxique que déclenche l'infection incontrôlée. Enfin, le développement de sérums de convalescents est étudié en Chine et aux États-Unis, ceux-ci produisant des anticorps spécifiques au virus. En les transfusant aux malades, on peut diminuer la charge virale. À travers le monde, pas moins de 120 molécules sont actuellement envisagées comme pistes potentielles contre le Covid-19, dont 31 sont considérées comme « sérieuses ». Pour l'heure, deux ou trois seulement ont déjà prouvé leur intérêt lorsqu'elles étaient administrées à « titre compassionnel » pour les cas critiques. ■ **H. J.**


VINCENT MONCORGE / DIVERGENCES

INTERVIEW

PR BRUNO LINA

DIRECTEUR DU LABORATOIRE VIRPATH AU CENTRE INTERNATIONAL DE RECHERCHE EN VIROLOGIE. MEMBRE DU CONSEIL SCIENTIFIQUE PRÉSIDENTIEL

« Le Sras-Cov-2 restera durablement avec nous »

Le virus Sras-CoV-2 finira-t-il par disparaître ?
Non, il deviendra endémique. C'est-à-dire qu'il va circuler partout sur la planète de façon persistante. Nous sommes face à un virus qui est sorti d'un réservoir animal, la chauve-souris, pour devenir parfaitement transmissible d'humain à humain. Et aucun signal ne permet de dire que la transmission va cesser. Il y aura peut-être un effet de saisonnalité qui le fera passer à l'hémisphère Sud, mais c'est un virus émergent qui restera durablement avec nous, au même titre que des centaines d'autres d'ailleurs. En l'occurrence, ce sera le cinquième coronavirus humain endémique, sans compter l'épidémie de Sras (2003) et de Mers (2012).

Faut-il s'inquiéter d'éventuelles mutations ?
Contrairement à une idée reçue, un virus a tendance à perdre de sa virulence lorsqu'il circule librement. Son intérêt évolutif est en effet de circuler le plus possible et ce sont donc les formes les moins agressives qui deviennent les plus fréquentes. D'autant qu'à mesure que la grande majorité des malades va guérir, une immunité dite de groupe va se mettre en place à l'échelle planétaire, ce qui freinera à la fois la diffusion du virus et son pouvoir pathogène. Les 4 autres coronavirus humains connus ne provoquent plus aujourd'hui que des rhumes dans la plupart des cas. Pourtant, ils sont eux aussi sortis un jour d'un réservoir animal.

Quelle stratégie en attendant ?
Ralentir coûte que coûte la diffusion du virus en respectant les mesures de confinement.
C'est vital pour que les structures de soins restent en capacité de répondre à l'afflux de malades. Et donc sauvent des vies. C'est un effort collectif pour éviter la catastrophe qui concerne non seulement les soignants et le système de santé, mais l'ensemble des Français. Chacun d'entre nous a un rôle très important à jouer. ■

Propos recueillis par H. J.

Ce que l'on sait de ce virus… et ce qu'on ignore

Les mécanismes d'action du coronavirus Sras-CoV-2 commencent à être décryptés mais il reste beaucoup de zones d'ombre.

De quels animaux le virus provient-il ?

À l'origine, le Sras-CoV-2, de la famille des coronavirus (du latin *corona*, couronne, en raison de leur aspect évoquant la couronne d'épines de Jésus-Christ), vient probablement d'une chauve-souris. Plusieurs indices orientent en ce sens : c'est un mammifère — la même classe d'animaux que l'être humain — et elle est connue pour être le réservoir de nombreux virus émergents (rougeole, oreillons, grippe, encéphalites…). La chauve-souris héberge également des virus animaux, comme celui provoquant la maladie de Carré chez le chien.
Le coronavirus a-t-il été hébergé par un hôte intermédiaire avant d'infecter l'être humain ? Le pangolin *(photo)*, espèce présente sur certains marchés chinois, a été évoqué mais sans certitude pour le moment. Il faudrait disposer de l'ensemble des données génétiques des coronavirus de toutes ces espèces et les comparer à celles du Sras-CoV-2 pour en avoir le cœur net.

NATUREPL/EBPHOTO

Quel est le nombre de porteurs sains ou peu symptomatiques ?

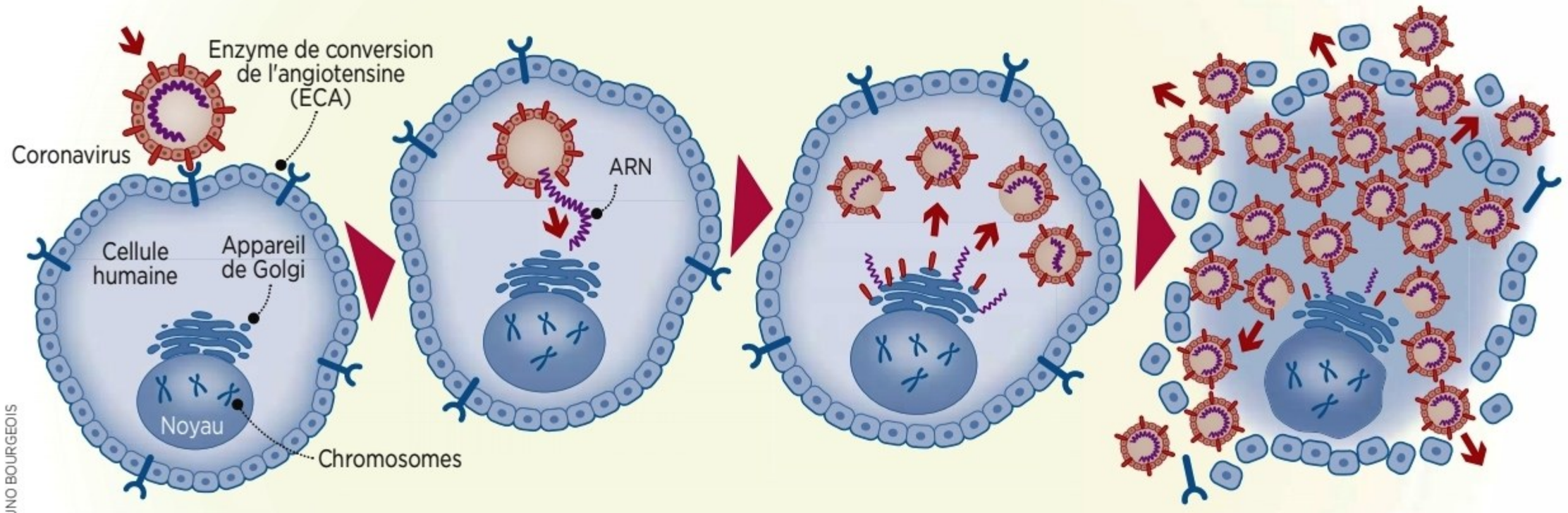
C'est l'une des grandes inconnues, en tout cas celle qui décidera de l'ampleur de l'épidémie. En effet, plus le virus passe inaperçu — ne provoquant aucun symptôme — et se transmet sans que son porteur ni le personnel de santé ne s'en aperçoivent, ou si peu, plus il se propage silencieusement et infecte de personnes. Paradoxalement, la faible dangerosité du virus à ce stade est sa plus grande force puisqu'elle lui permet de se disséminer largement. La durée de ce temps de latence ne sera connue qu'une fois la pandémie éteinte et lorsque les scientifiques disposeront de suffisamment de recul.

Quelle durée d'incubation ?

À l'heure où nous écrivons, les spécialistes estiment que la durée moyenne d'incubation du Sras-coV-2 — délai avant l'apparition des premiers symptômes — est de 3 à 5 jours, mais elle peut s'étaler jusqu'à 14 jours. Au contraire du Sras (2002-2003), qui donnait quasi systématiquement des formes sévères, le Sras-CoV-2 provoque peu de symptômes et se traduit par une maladie bénigne dans plus de 80 % des cas *(voir p. 66)*. Il est en revanche très contagieux, chaque malade

MÉCANISME

Comment infecte-t-il les cellules?



BRUNO BOURGEOIS

LE SRAS-COV-2 pénètre dans le corps par le nez, la bouche et les yeux. Il se fixe alors aux protéines ECA2 (enzyme de conversion de l'angiotensine 2), présentes à la surface des cellules, pour lesquelles il a une très bonne affinité.

APRÈS AVOIR FUSIONNÉ sa membrane avec celle de la cellule hôte, la particule virale se retrouve à l'intérieur. Le virus libère alors son patrimoine génétique constitué d'ARN.

LE MATÉRIEL GÉNÉTIQUE est constitué de 30 000 « lettres ». Il pirate alors la machinerie cellulaire pour lui faire produire en masse des copies de son ARN et de ses protéines virales. Celles-ci s'assemblent pour former de nouveaux virions.

EN QUELQUES HEURES des millions de copies sont produites. Comme un sac trop plein, la cellule craque alors de toutes parts et laisse échapper ses envahisseurs qui peuvent alors coloniser d'autres cellules. Le processus peut dès lors se répéter.

infectant entre 2 et 3 personnes en moyenne.

Quelle est sa mortalité?

À l'heure où nous rédigeons ses lignes, elle est d'environ 2 % : 2 morts pour 100 contaminés. Soit dix fois celle de la grippe. Mais, ce chiffre évolue en permanence et a toutes les chances de diminuer au fil du temps et de l'acquisition de nouvelles données. Principale raison : le nombre de contaminés serait beaucoup plus important que celui comptabilisé aujourd'hui, étant donné que beaucoup de personnes seraient porteuses du virus sans le savoir *(lire également questions 2 et 3)*.

Le virus a-t-il muté?

Sans aucun doute car un virus, quel qu'il soit, mute en permanence. En cause : les erreurs de copie commises dans son matériel génétique lorsqu'il se multiplie. L'ampleur de cette mutation est un point crucial à connaître car elle est déterminante pour cibler la réponse thérapeutique. Un vaccin sera ainsi d'autant plus efficace que le virus aura peu muté entre le moment séparant sa conception et celui de sa mise à disposition auprès des malades plusieurs mois plus tard. Ce taux de mutation est assez grand pour le virus de la grippe, raison pour laquelle le vaccin saisonnier n'est efficace que sur 30 à 60 % des personnes selon les années. Heureusement, la famille des coronavirus est réputée pour muter assez peu. Les chercheurs ont donc bon espoir que le futur vaccin se révèle très efficace.

LE + NUMÉRIQUE
Toutes les actualités en temps réel sur l'épidémie de Covid-19 sont à suivre sur notre site internet : **sciav.fr/Covid19**

Va-t-il disparaître aux beaux jours?

C'est ce que beaucoup de chercheurs et de médecins espèrent. Se fondant sur ce qui se passe avec la grippe chaque année, ils estiment que le Sras-CoV-2 devrait s'éteindre d'ici à l'été. Si elle était avérée, cette disparition ne devrait rien à la hausse des températures, tous les virus étant habitués à la chaleur et s'épanouissant dans des organismes à la température proche de 40 °C. Ce sont les habitudes humaines qui devraient lui nuire : aux beaux jours, chacun sort davantage, dans des lieux non confinés, et les logements sont plus aérés. Ce qui limite la transmission interhumaine des agents pathogènes, quels qu'ils soient. ■

Hervé Ratel

Comment le conseil scientifique a opté pour le confinement

Récit, par les membres du comité scientifique constitué par le gouvernement, des jours qui ont conduit à cette décision historique.

LES MEMBRES DU COMITÉ SCIENTIFIQUE

Laëtitia Atlani-Duault, anthropologue, IRD
Daniel Benamouzig, sociologue, CNRS
Lila Bouadma, réanimatrice, hôpital Bichat (Paris)
Simon Cauchemez, modélisateur, Institut Pasteur
Jean-François Delfraissy, président du Comité consultatif national d'éthique
Pierre-Louis Druais, médecin membre de la Haute Autorité de santé
Arnaud Fontanet, épidémiologiste, Institut Pasteur (Paris)
Bruno Lina, virologue, université Lyon 1
Denis Malvy, infectiologue, CHU Pellegrin (Bordeaux)
Didier Raoult, infectiologue, CHU de la Timone (Marseille)
Yazdan Yazdanpanah, infectiologue, Inserm

« NOUS AVONS SENTI *le basculement à partir de la fin de la première semaine de mars,* témoigne le Pr Yazdan Yazdanpanah, chef du service des maladies infectieuses à l'hôpital Bichat, à Paris. *Nous avons vu arriver des malades graves dans les services de réanimation et la mortalité était supérieure à celle de la grippe.* » Ces malades graves comptent pour 5 % des patients. Ils ont souvent besoin d'être intubés et leur temps d'hospitalisation peut atteindre les trois semaines. Face à ce nouvel afflux, l'épidémie apparaît sous un nouveau jour. Depuis le 24 janvier, date de déclaration du premier cas venu de Chine, la situation évolue par à-coups, avec les cas des Contamines-Montjoie (Haute-Savoie), attribués à un Britannique venu de Singapour. Puis un enseignant meurt à l'hôpital, révélant le foyer caché dans l'Oise. « *Le temps s'accélère soudain,* raconte l'épidémiologiste Arnaud Fontanet. *Nous rentrons dans une deuxième phase avec plusieurs clusters* [foyers de contamination] *de plus en plus difficiles à contenir.* » Les 7 et 8 mars, à la fin de cette fameuse première semaine, « *la situation bascule avec 81 nouveaux cas à Mulhouse en 24 heures, à la suite d'un rassemblement religieux* », continue Arnaud Fontanet. C'est une « *prise de conscience* », il faut se rendre à l'évidence : l'épidémie « *passe à la vitesse supérieure* ».

Le jeudi 12 mars, le conseil scientifique ne dispose encore que de données parcellaires sur la façon dont le virus touche les enfants,

© NICOLAS PORTNOI / HANS LUCAS / AFP

Le 16 mars, le président de la République Emmanuel Macron annonce dans son allocution télévisée les mesures de confinement.

se rappelle Arnaud Fontanet. Néanmoins, « *les premières données chinoises montrent qu'il les infecte autant que les adultes* », ce qui a guidé la décision « *très difficile* » du conseil scientifique : recommander la fermeture des établissements scolaires et universités. « *De 34 cas de malades en réanimation le mardi 10 mars, nous en avons, une semaine plus tard, plus de dix fois plus* », précise le Pr Jean-François Delfraissy.

Les décisions difficiles s'enchaînent

« *La perception de la gravité de la maladie par les Français était très évolutive,* constate alors Laëtitia Atlani-Duault, directrice de recherche en anthropologie sociale à l'Institut de recherche pour le développement (IRD). *Entre prise de décision et acceptation sociale, il y a un monde… qui se trouvait dans les parcs et jardins dimanche 15* », remarque le Pr Jean-François Delfraissy.

Les décisions difficiles s'enchaînent, fondées notamment sur des modèles mathématiques parfois alarmants. « *Les chiffres de 50 % des Français touchés dont 300 000 à 500 000 morts circulent, mais les modèles mathématiques font souvent des prédictions exagérées* », tempère Arnaud Fontanet. Il rappelle que la vache folle avait fait 200 morts, là où les modèles en prévoyaient mille fois plus. « *Il est très difficile de prédire la trajectoire que suivra l'épidémie* », aussi les modèles servent-ils plutôt à « *tester les mesures qui vont avoir le meilleur impact* ». Mais le risque est réel. Il conduira à la décision d'Emmanuel Macron de réclamer le confinement — sans le nommer — mardi 17 mars. ■ **Camille Gaubert**

@CamilleGaubertb

Les voyages du SAVOIR SCIENCES ET AVENIR

DOLMENS ET MENHIRS DE CARNAC

En compagnie d'Yves Coppens (*)

27 au 30 septembre 2020

YVES COPPENS
Paléontologue, professeur au Collège de France

« **J'ai 100.000 tonnes de granit sur les bras** ». Yves Coppens s'amuse du nouveau rôle qu'il a accepté d'endosser, celui de « champion » de l'inscription des alignements de Carnac au patrimoine mondial de l'Unesco. Car le site du Morbihan, en Bretagne, n'y est toujours pas : sacrée injustice quand on pense à un autre lieu célèbre pour ses mégalithes, Stonehenge, en Angleterre, honoré du précieux label depuis... 1986 ! Il explique ce que les dolmens, menhirs, cairns et autres alignements de Carnac auraient à bénéficier de cette inscription au patrimoine mondial de l'Unesco, pourquoi ce site est «sacré» et le rôle historique joué par la Bretagne - chère à son cœur... - dans l'histoire du mégalithisme.

C'est à la découverte de ces « cailloux » extraordinaires sur les rivages du golfe du Morbihan qu'Yves Coppens invite les lecteurs de Sciences et Avenir !

Retrouvez l'entretien complet d'Yves Coppens avec Dominique Leglu sur le site web de Sciences et Avenir : bit.ly/2tFuekq

AVEC LA PARTICIPATION DE :

BERNADETTE ARNAUD
Grand Reporter à Sciences et Avenir

© Laurent Rannou

EMMANUELLE VIGIER
Archéologue, directrice du Musée de Préhistoire de Carnac

MARC SAUGIER
Organisateur des Voyages du Savoir

Carnac :
Le musée de Préhistoire

- 3 nuits / 4 jours en pension complète
- Prix par personne en chambre double : 975 €
- Début & fin du séjour à Auray (Morbihan)

(*) Sauf empêchement pour cas de force majeure

IM056130002

BLB TOURISME

RENSEIGNEMENTS ET RÉSERVATIONS : **BLB** TOURISME
ZONE DE KERBOIS 15, RUE YVES DE KERGUELEN 56400 AURAY
COURRIEL : inscription@blb-tourisme.com - Tél. +33 (0) 297 566 086

Programme complet, renseignements et inscriptions sur le site web : voyages-du-savoir.fr

Herbes et plantes aromatiques, des saveurs vitaminées

Frais ou séchés, ces végétaux sont riches en nutriments et en antioxydants, même consommés en petites quantités.

Avec leur parfum subtil ou corsé, les herbes et plantes aromatiques donnent du relief et de la couleur aux salades, viandes, poissons et desserts. Mais avant que persil, estragon, thym, basilic ou sarriette agrémentent les plats — surtout méridionaux —, ces plantes servaient de remèdes. Les Égyptiens utilisaient ainsi l'aneth pour ses vertus antispasmodiques et l'origan, ou marjolaine sauvage, était préparé en décoction ou en cataplasmes pour soigner les plaies en raison de ses vertus antalgiques et antiseptiques. Quant au persil, réuni avec la ciboulette, l'estragon et le cerfeuil sous l'appellation de « fines herbes », il parfumait l'intérieur des habitations romaines pour lutter contre les mauvaises odeurs. Aujourd'hui encore, bien qu'elles soient consommées en petites quantités, les herbes et les plantes aromatiques fraîches ou séchées restent bénéfiques pour la santé, grâce à leur richesse en nutriments et en antioxydants. Le point sur ces saveurs vertes qui constituent de bonnes alternatives au sel.

42 g
de fibres
sont apportés par 100 g d'origan ou de romarin séchés; 7,4 g/100 g de menthe fraîche; 6,2 g/100 g d'estragon frais, 4,3 g/100 g de persil frais et 3,5 g/100 g d'aneth frais.
(SOURCE: TABLE CIQUAL, ANSES)

Une bonne source de vitamines...

Le persil et le thym frais sont les plus riches en vitamine C, avec respectivement 177 mg/100 g et 160 mg/100 g (1). L'origan, le thym et la sauge séchés ainsi que la coriandre, le basilic et la ciboulette frais apportent de la vitamine K, indispensable à la croissance et au renouvellement du tissu osseux ainsi qu'à la coagulation sanguine (il faut donc les consommer avec modération lorsqu'on est sous traitement anticoagulant). Les herbes aromatiques fournissent également des vitamines du groupe B, dont l'acide folique (B9) avec 220 µg/100 g pour le cerfeuil frais.

... et de minéraux

10 g de thym séché apportent 20 % des besoins journaliers en calcium pour un adulte (950 mg). L'estragon, le thym et la menthe frais contiennent du fer en grande quantité (respectivement 32,3 mg/100 g;

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

ANTIOXYDANTS Composés produits par les végétaux pour se protéger des agressions environnementales. Ils sont capables, lorsque nous les assimilons, de neutraliser les radicaux libres.

ÉQUILIBRE ACIDO-BASIQUE Équilibre entre l'acidité et l'alcalinité du corps, influencé en grande partie par l'alimentation. Le corps le maintient grâce aux systèmes de régulation comme les poumons et les reins.

VITAMINES HYDROSOLUBLES Substances solubles dans l'eau non stockées dans l'organisme. Elles comprennent la vitamine C et les vitamines du groupe B (B1 à B12). On les distingue des vitamines liposolubles (A, D, E et K), stockées dans l'organisme.

17,5 mg/100 g et 8,48 mg/100 g), indispensable au transport de l'oxygène, à la fabrication des globules rouges et au renouvellement cellulaire. Les herbes et plantes aromatiques procurent également du phosphore (46,3 mg/100 g pour la ciboulette fraîche), du magnésium (64 mg/100 g pour le basilic frais) et du potassium (647 mg/100 g pour l'aneth frais), qui, avec l'aide du sodium, contribue à l'équilibre acido-basique de l'organisme ainsi qu'à la transmission des impulsions nerveuses et à la contraction musculaire.

Elles apportent des composés antioxydants

Thym séché, basilic et coriandre frais renferment de grandes quantités de bêtacarotène (2260 à 3930 µg/100 g), précurseur de la vitamine A nécessaire à une bonne vision. Les herbes aromatiques sont aussi une source intéressante de polyphénols, parmi lesquels l'acide gallique (ciboulette), la coumarine (coriandre), l'acide rosmarinique et l'acide caféique (thym, menthe) ou encore l'apigénine (thym, persil, romarin). Ce flavonoïde pourrait contribuer à la régulation du glucose sanguin, observée chez le rat diabétique (2). Selon des travaux brésiliens menés *in vitro* sur des cellules souches humaines, l'apigénine favoriserait également la formation des neurones du cerveau et renforcerait leurs connexions (3).

Elles pourraient combattre certains maux

L'Organisation mondiale de la santé (OMS) reconnaît l'usage du thym contre la mauvaise digestion (dyspepsie). Par ailleurs, le persil permettrait de combattre l'halitose, la mauvaise haleine. Riche en composés phénoliques, il dégraderait certains composés sulfurés formés dans la bouche et dans l'intestin, particulièrement à la suite de l'ingestion d'ail ou de ses dérivés (4). La chlorophylle contenue dans le basilic, la coriandre et la menthe aiderait aussi à neutraliser les mauvaises odeurs.

Attention aux intoxications et aux pesticides

Certaines bactéries telles que les entérobactéries ou *Bacillus cereus*, présentes dans les sols, peuvent contaminer les herbes fraîches. Bien les laver avant leur consommation prévient le risque d'intoxication alimentaire. En outre, même séchées ou surgelées, elles peuvent aussi contenir des traces de pesticides comme l'a observé le magazine *Que Choisir* (5). Certes à des doses infimes mais l'accumulation pose problème : dix pesticides ont ainsi été décelés dans la ciboulette du distributeur Leader Price, 15 dans le persil séché de Ducros, parmi lesquels l'azoxystrobine, le propamocarbe et le difénoconazole, des fongicides.

Vérifier leur provenance

Avec des prix variant de 400 à 1100 € le kg pour la ciboulette, le basilic ou la coriandre, les herbes aromatiques sèches se vendent à prix d'or (6). Mieux vaut donc les cultiver soi-même, en pot ou en pleine terre. Attention aussi aux allégations mensongères. Seules 10 % des herbes dites de Provence ont poussé dans la région, le reste étant importé du Maroc, d'Espagne voire... de Pologne. Et pour cause, cette appellation ne fait l'objet d'aucune réglementation, les fabricants étant libres de réaliser leur propre mélange. En revanche, on peut se fier aux produits arborant le Label rouge, lequel impose que les herbes soient originaires de Provence. Le mélange est précisément fixé : 27 % de sarriette, 27 % de romarin, 27 % d'origan et 19 % de thym. ■

Sylvie Boistard

ALEXANDRA RETION Nutritionniste et diététicienne à Paris

Mieux vaut les choisir fraîches ou surgelées

« Une fois coupées, les herbes aromatiques fraîches se conservent trois à quatre jours dans le bac à légumes du réfrigérateur ou dans un grand verre d'eau. L'idéal est d'en consommer l'équivalent de deux cuillères à soupe à chaque repas afin de profiter des bienfaits de leurs nutriments et de leur richesse en fibres. Riches en eau (90 %) et en huiles essentielles, les herbes fraîches gardent également toutes leurs qualités organoleptiques, ce qui n'est pas le cas des herbes sèches. Déshydratées, elles perdent une grande partie de leurs vitamines hydrosolubles, telles les vitamines C et celles du groupe B. Si l'on désire profiter des herbes aromatiques toute l'année, il vaut mieux les choisir surgelées. Une récolte à maturité et les techniques rapides de surgélation permettent de conserver la grande majorité des vitamines et minéraux. »

(1) Table nutritionnelle Ciqual, Anses, 2019.

(2) Effects of Petroselinum crispum extract on pancreatic B cells and blood glucose of streptozotocin-induced diabetic rats, Yanardag R. et al, *Biological and Pharmaceutical Bulletin*, 2003.

(3) Commitment of human pluripotent stem cells to a neural lineage is induced by the pro-estrogenic flavonoid apigenin, Souza CS. et al, *Advances in Regenerative Biology*, 2015.

(4) Effects of food materials on removal of Allium-specific volatile sulfur compounds, Negishi O. et al, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002.

(5) Comparatif herbes aromatiques, *Que Choisir*, septembre 2014.

(6) Prix des herbes aromatiques « sèches » vendues en grandes surfaces, enquête de la CLCV, 2017.

Sabine Bensamoun, physicienne

Radiologue 2.0

Cette chercheuse a développé une technique d'imagerie médicale, l'élastographie par résonance magnétique, pour sonder les propriétés mécaniques des tissus mous du corps humain sans prélèvement. Ses applications ne cessent de s'étendre.

« Étudiante, j'étais tiraillée *entre mon envie de devenir médecin et ma passion pour les sciences de la matière*, raconte Sabine Bensamoun, directrice de recherche au CNRS et à l'université technologique de Compiègne (UTC), dans l'Oise. *Ce que je désirais sans doute le plus était de faire des recherches fondamentales qui aideraient des malades et auraient sur eux un impact direct.* » Aujourd'hui coresponsable d'une équipe d'une quarantaine de personnes au Laboratoire de biomécanique et de bio-ingénierie de Compiègne, la physicienne peut se réjouir. Grâce aux travaux qu'elle mène depuis une quinzaine d'années, une nouvelle technique d'imagerie médicale est désormais utilisée dans plus de 40 centres hospitaliers et de radiologie en France et ne cesse de se développer. L'élastographie par résonance magnétique (ERM) permet de sonder les propriétés mécaniques des tissus mous du corps humain... sans faire de prélèvement ni même les toucher !

Couplée à un appareil d'IRM (imagerie par résonance magnétique), la technique diffuse sous la peau des ondes de pression qui font vibrer les atomes d'hydrogène des molécules d'eau, abondantes dans les tissus mous. « *Les caractéristiques de ces ondes, notamment leur vitesse, varient selon la rigidité des tissus*, explique Sabine Bensamoun. *Après analyse, elles fournissent ainsi une cartographie très précise de l'élasticité d'un organe, dévoilant certaines pathologies et leur évolution.* » Depuis le début des années 2010, l'ERM est couramment utilisée pour diagnostiquer les maladies chroniques du foie, telles que les cirrhoses. « *Plus un foie est malade, plus il devient fibreux et durcit* », explique la chercheuse. Mais d'autres applications devraient bientôt émerger, pour des pathologies musculaires notamment.

BIO EXPRESS

1976 Naissance à Paris.

2003 Doctorat en biomécanique à l'Université technologique de Compiègne (Oise).

2006 Prix de la Société internationale de biomécanique.

2010 Prix Jeune Chercheur (médaille d'argent) au Congrès mondial de biomécanique.

2016 Chercheuse CNRS associée à la Mayo Clinic, Rochester, Minnesota, États-Unis.

2019 Directrice de recherche au CNRS.

Des efforts qui débouchent sur un brevet

Depuis janvier, à l'Institut Faire Faces d'Amiens (Somme), Sabine Bensamoun conduit les premiers tests cliniques sur des personnes atteintes de paralysie faciale. « *L'ERM fournit des données quantitatives, inexistantes jusqu'alors, sur les déformations et la contractilité des muscles peauciers de la face, comme le grand zygomatique qui permet le sourire et ne mesure que quelques millimètres d'épaisseur*, se réjouit le Pr Bernard Devauchelle, cofondateur de l'Institut Faire Faces et auteur en 2005 de la première greffe partielle du visage. *Grâce à cette technique, nous pourrons visualiser les fibroses musculaires et suivre précisément l'effet des traitements.* » Sabine Bensamoun est « *une chercheuse brillante qui déborde d'enthousiasme et fait preuve de beaucoup de pugnacité dans les objectifs qu'elle se fixe* », atteste-t-il.

Au début des années 2000, la jeune femme soutient une thèse sur les propriétés mécaniques et morphologiques des tissus musculosquelettiques... tout en pratiquant le tennis à très haut niveau : classement 1/6, avant de participer au tournoi de Roland-Garros à Paris dans la catégorie des plus de 35 ans. Ses études postdoctorales la conduisent ensuite à la Mayo Clinic de Rochester (États-Unis), où l'ERM avait été inventée quelques années plus tôt par le radiologue Richard Ehman. « *Les principes physiques de l'ERM étaient alors bien établis mais pas ses applications concrètes* », rappelle Sabine Bensamoun. Très peu de choses, en particulier, avaient été réalisées sur les muscles. Jusqu'en 2006, elle développe ainsi un stimulateur d'ondes de pression à basse fréquence permettant d'appliquer l'ERM aux muscles de la cuisse. « *Leur nombre — une dizaine — et les épaisses barrières graisseuses qui les ceignent compliquaient énormément les choses* », souligne-t-elle. Sans compter que le stimulateur devait fonctionner pour toutes les corpulences, en répartissant judicieusement les ondes de pression à l'intérieur de la cuisse. « *Nous avons travaillé pendant plus de six mois sans détecter le moindre signal* », se remémore-t-elle. Mais ses efforts ont fini par payer, avec un brevet à la clé. « *Le stimulateur fonctionne aujourd'hui à merveille*, assure la quadragénaire. *Et ces*

ARNAUD MEYER/LEEXTRA POUR SCIENCES ET AVENIR

travaux pourraient profiter à terme au milieu sportif. » Pour monitorer les muscles profonds lors d'un claquage, par exemple.

De retour en France, Sabine Bensamoun continue à travailler sur les applications de l'ERM aux lésions musculaires, son domaine de prédilection, mais également les maladies hépatiques. La palpation du foie, couramment pratiquée, n'apporte en effet que des informations subjectives ; le FibroScan, examen échographique, fournit certes des mesures chiffrées, mais de certaines parties de l'organe et non de la totalité. Quant aux biopsies, elles provoquent 2 à 3 % d'accidents dont certains (environ 1 sur 1000) peuvent être mortels. L'ERM est donc apparue comme une alternative précieuse. « *Pour obtenir les autorisations et la commercialiser, la Mayo Clinic avait besoin toutefois d'un grand nombre de données cliniques*, explique Sabine Bensamoun. *Elle a donc fait appel à plusieurs équipes de chercheurs à travers le monde, notamment en France sous ma direction.* »

Elle a formé des dizaines de radiologues à l'ERM

Entre 2007 et 2009, elle expérimente ainsi la toute première ERM de l'Hexagone, au Centre d'imagerie médicale avancée de Compiègne. « *Les valeurs de référence que nous avons établies ont servi à valider l'ERM hépatique et à diffuser la technique partout dans le monde* », indique Sabine Bensamoun. C'est également à Compiègne que cette dernière formera des dizaines de radiologues et sensibilisera quantité de médecins français. « *L'appareil coûte un peu moins de 100 000 euros, 15 fois moins que les IRM auxquelles il est associé* », précise-t-elle.

Alors que les ERM hépatiques sont aujourd'hui routinières et que les tests cliniques débutent pour les paralysies du visage, l'infatigable physicienne travaille déjà sur d'autres applications. « *Je suis convaincue que l'ERM sera couramment utilisée pour sonder l'élasticité du cerveau* », estime-t-elle. Dans le but de caractériser la rigidité des tumeurs cérébrales, par exemple, ce qu'aucune technique ne peut faire actuellement, et aider ainsi les chirurgiens à les extraire... Mais surtout pour diagnostiquer, très précocement, des maladies neurodégénératives comme celle d'Alzheimer, caractérisée par des dépôts de protéines qui durcissent peu à peu les tissus mous du cerveau. ■

Franck Daninos @fdaninos

« C'est une chercheuse brillante qui déborde d'enthousiasme et fait preuve de beaucoup de pugnacité dans les objectifs qu'elle se fixe »

Bernard Devauchelle, chirurgien qui a réalisé la première greffe partielle de visage au monde en 2005, cofondateur de l'Institut Faire Faces, à Amiens

Protéger son audition

Faire répéter son interlocuteur, ne plus comprendre ce que l'on entend… tels sont les premiers signes d'un trouble de l'audition. Et cela peut avoir des répercussions sur la vie sociale et les fonctions cognitives. Se protéger des nuisances sonores, et s'équiper lorsque c'est nécessaire, est donc essentiel.

« Une très large partie de la population *française a déjà fait l'expérience d'une gêne auditive, même occasionnelle*, déclaraient en 2018 les experts de la Journée nationale de l'Audition (JNA). *Ainsi, 82 % des personnes interrogées à cette occasion déclarent avoir déjà eu des difficultés à comprendre des conversations lorsqu'il y a du bruit autour d'eux.* » Et cette année, une alerte spécifique concerne le monde professionnel : « *56 % des actifs en poste déclarent avoir des difficultés à suivre les conversations au travail en raison du bruit ambiant* », déploraient ainsi les spécialistes, à l'occasion de la 4e édition de la campagne nationale Semaine de la santé auditive au travail qui s'est tenue du 14 au 18 octobre 2019. Or, si ces troubles constituent une des premières indications pour réaliser un bilan auditif chez un médecin ORL, seulement un tiers des Français a déjà effectué cette démarche. C'est largement insuffisant. Les troubles de l'audition peuvent en effet avoir de nombreuses répercussions : en perturbant les relations avec autrui, ils peuvent conduire à un isolement social, voire à des troubles anxio-dépressifs ; en privant le cerveau d'informations sonores, ils affectent le fonctionnement de la mémoire et de la cognition, comme le rappelait une étude prospective française publiée en octobre 2015 dans le *Journal of the American Geriatrics Society*.

6 %
des 15-24 ans sont confrontés à des problèmes de surdité

18 %
des 35-44 ans

65 %
des plus de 65 ans

(SOURCE : INSERM, 2017)

Ne pas négliger la presbyacousie

Si de nombreux facteurs peuvent affecter l'audition, l'appareil auditif subit un phénomène normal de vieillissement appelé presbyacousie. Celle-ci apparaît en général à partir de 50-60 ans et résulte de la dégénérescence progressive des cellules ciliées de la cochlée *(voir l'infographie ci-contre)* qui transforment les vibrations sonores en informations nerveuses pour le cerveau. Au début, l'atteinte est insidieuse et concerne les fréquences les plus aiguës. Les deux oreilles sont touchées de façon symétrique. La personne, ou plus souvent son entourage, constate des difficultés de compréhension de la parole dans des ambiances bruyantes. Dès les premiers troubles, un bilan complet chez un médecin ORL permet de faire le point sur les causes et les parades à mettre en œuvre. Plus on agit tôt, et plus on peut retarder l'évolution du phénomène et surtout se protéger des conséquences sociales et cognitives de la perte d'audition.

L'importance du bilan auditif

Lors d'un bilan ORL, le médecin procède à un examen complet de l'oreille pour déceler d'éventuels traumatismes mécaniques, par exemple. L'audiogramme, ou audiométrie tonale, est l'examen de référence : il permet de mesu-

Les caractéristiques du son

Intensité. Elle correspond à l'amplitude des vibrations sonores, autrement dit au volume, et se mesure en décibels (dB). 0 dB correspond à l'absence de son, 60 dB au volume de la voix d'une personne, 120 dB au seuil de la douleur pour l'oreille humaine.

Au-delà de 85 dB, une exposition de plus de huit heures nécessite une protection.

Au-delà de 90 dB (perceuse), il faut limiter l'exposition à deux heures.

Au-delà de 100 dB (marteau piqueur), il ne faut pas dépasser quinze minutes d'exposition.

Passé 115 dB (avion au décollage), des bruits très brefs provoquent immédiatement des dommages irréversibles.

(Source : recommandations Inserm)

Fréquence. C'est le nombre de vibrations sonores par seconde, autrement dit la hauteur du son. Elle se mesure en hertz (Hz) : l'oreille humaine perçoit les sons entre 20 Hz (en deçà on parle d'infrasons) et 20 000 Hz (au-delà on parle d'ultrasons).

Durée. Le temps pendant lequel un son est perçu a des répercussions sur l'oreille. Le niveau sonore équivalent (Leq) est souvent utilisé pour apprécier la gêne due aux bruits, et définir des valeurs d'exposition.

L'oreille, un système performant mais fragile

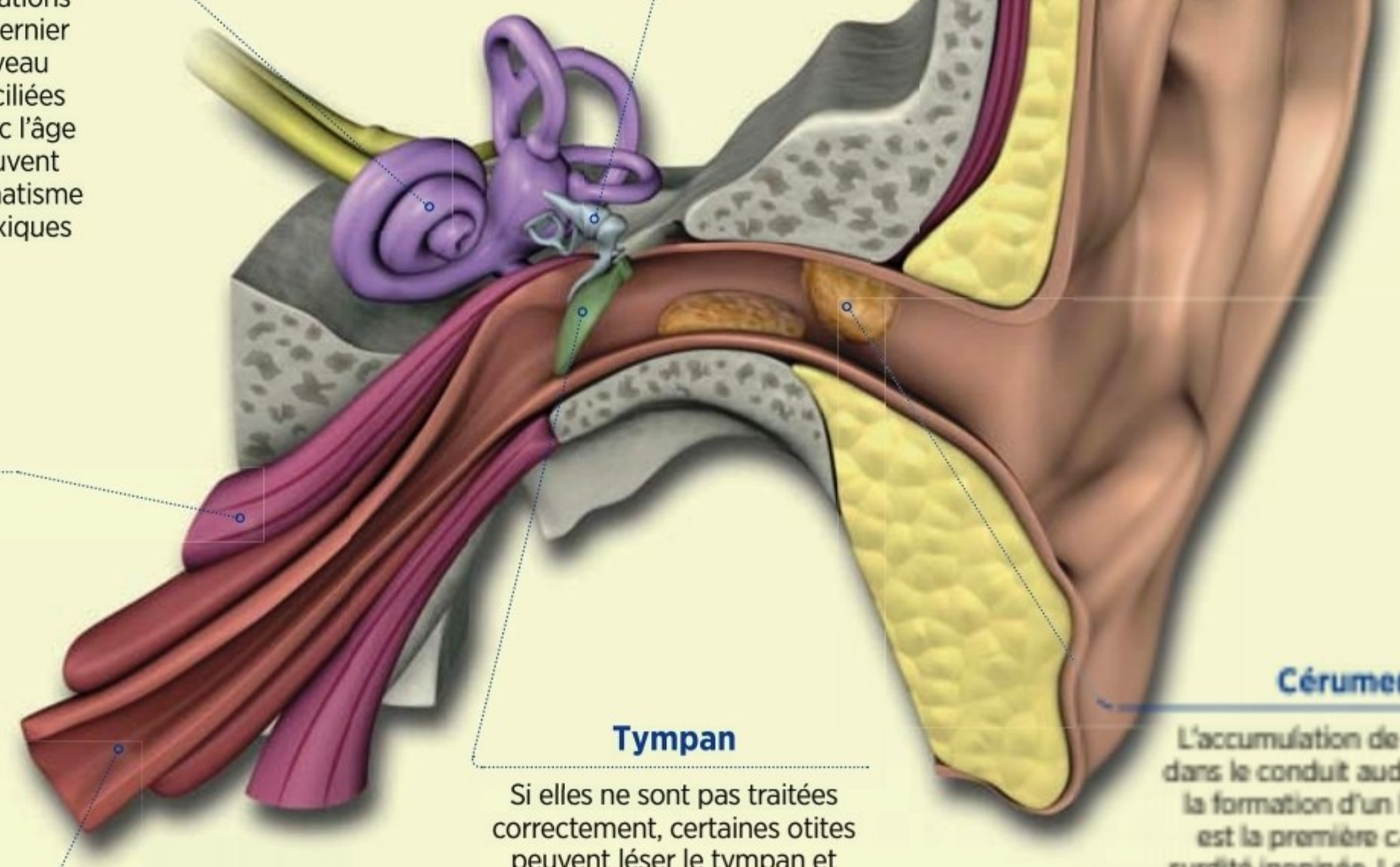
L'ouïe est un sens qui fonctionne en permanence, même lorsque nous dormons. Les différentes structures qui nous permettent d'entendre peuvent être soumises à de nombreuses contraintes, traumatismes ou maladies, conduisant à une perte partielle ou complète de l'audition.

Osselets

La perte de mobilité d'un des osselets, en général l'étrier, peut conduire à une surdité. Cela peut être dû à des otites de type cholestéatome (formation anormale d'épiderme sur les osselets), à une fracture suite à un choc violent à la tête, ou à la rigidification des ligaments qui les soutiennent due à une maladie héréditaire appelée otospongiose (provoquée par une déficience du renouvellement de l'os de l'oreille).

Cochlée

Elle renferme plus de 16 000 cellules ciliées qui transforment les vibrations sonores en signal nerveux, ce dernier étant ensuite transmis au cerveau par le nerf auditif. Ces cellules ciliées disparaissent naturellement avec l'âge (presbyacousie). Mais elles peuvent aussi être détruites par un traumatisme sonore ou des médicaments toxiques pour l'oreille interne.



Nerf auditif

Certains médicaments peuvent avoir pour effets secondaires de provoquer la destruction progressive du nerf auditif. Celui-ci peut aussi être endommagé par un neurinome, une tumeur bénigne, ou une infection de type méningite.

Trompe d'Eustache

Elle relie l'oreille moyenne à la cavité naso-buccale (on parle de sphère ORL), afin de protéger notamment le tympan contre les variations importantes de pression. Une infection prolongée ou mal soignée des sinus ou d'une dent peut conduire à une inflammation chronique de la trompe d'Eustache faisant des dégâts dans l'oreille moyenne.

Tympan

Si elles ne sont pas traitées correctement, certaines otites peuvent léser le tympan et conduire à une surdité plus ou moins importante. Des accidents barométriques (plongée sous-marine, aviation) peuvent aussi abîmer le tympan et d'autres membranes de l'oreille interne.

Cérumen

L'accumulation de cérumen dans le conduit auditif jusqu'à la formation d'un bouchon est la première cause de surdité inopinée. Le bouchon doit être dissous (en utilisant une solution pour instillations auriculaires ou du liquide physiologique), ou enlevé par un spécialiste. Il ne faut surtout pas utiliser d'objet pointu qui pourrait blesser le tympan ou le conduit auditif.

MEDICARTE GRAND BOULEVARD

rer sur plusieurs plages de fréquences la perte de sensibilité auditive. Celle-ci est considérée comme légère lorsque l'oreille perd 20 à 40 décibels (dB) de sensibilité, moyenne de 40 à 70 dB et sévère au-delà (on parle de surdité profonde lorsqu'elle est supérieure à 90 dB). Un « audio scan » — une technique numérique, plus moderne que l'audiogramme, qui mesure la perte auditive en continu sur toutes les fréquences auditives — peut fournir des données plus précises, qui sont comparées avec des audiogrammes de référence par classe d'âge. L'impédancemétrie permet, quant à elle, de mesurer la résistance mécanique du tympan et de la chaîne formée par les osselets. Ces examens peuvent être complétés par un test de potentiels évoqués auditifs (PEA), qui se focalise sur le nerf auditif en mesurant la conduction de l'influx nerveux de l'oreille jusqu'au système nerveux central à partir d'une stimulation extérieure. Si un neurinome (tumeur bénigne du nerf auditif) est suspecté, une IRM (imagerie par résonance moléculaire) permet de connaître sa localisation ▸

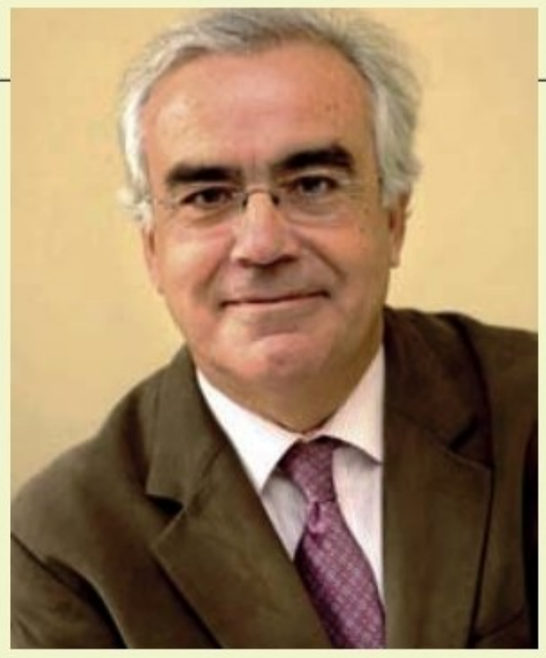
Dossier coordonné par
Caroline Brun,
Agence Forum News

Rédaction :
Régis de Closets,
Émilie Gillet

INTERVIEW

PROFESSEUR BRUNO FRACHET, chirurgien ORL à l'hôpital Rothschild, à Paris, coauteur de *L'Audition pour les nuls*, First

« Les jeunes peuvent réduire le risque de blessure sonore »



BRUNO FRACHET

Le gouvernement a annoncé la généralisation des tests auditifs pour les 15-16 ans d'ici à 2023. Quelles mesures de prévention vous semblent-elles utiles ?
Plusieurs opérations de dépistages gratuits ont été menées dans les universités : cela n'a pas donné grand-chose en matière de détection de surdités importantes. Une telle mesure serait plus utile chez les personnes âgées, quand la perte d'audition peut être couplée à un déclin cognitif. Chez les jeunes, il faut insister sur le port de bouchons d'oreille en discothèque, réduisant les volumes de 15 à 20 dB ou encore sur l'importance de s'éloigner d'au moins quatre mètres de la source d'un volume trop fort en concert, ce qui divise par neuf le risque de lésion auditive.

À terme, les progrès scientifiques permettront-ils un dépistage individualisé des risques ?
Les recherches sur les prédispositions génétiques ouvrent de vraies perspectives en la matière. On voit des différences dans l'élimination des radicaux libres au niveau des cellules ciliées d'une personne à l'autre. Certaines protéines clés commencent à être identifiées comme la pejvakine. Les individus portant des mutations de ce gène présentent des atteintes auditives variées. ■

Propos recueillis par R. de C.

Port de casques et usage de smartphones entraînent des gênes grandissantes et des acouphènes chez les jeunes. Va-t-on vers des générations de sourds précoces ?
Les risques existent, mais il ne faut pas être catastrophistes. La majorité des malentendants sont touchés par le vieillissement naturel de leur oreille. Certains comportements peuvent alarmer, comme l'usage des écouteurs chez les plus jeunes ou l'emploi de matériel défectueux. Mais les principaux problèmes d'audition des moins de 30 ans concernent des traumatismes souvent liés à des concerts, car le son émis en boîte de nuit est, lui, limité à 102 décibels (dB) par plage de 15 minutes, et les baladeurs ne peuvent excéder une puissance de sortie de 100 dB SPL (*sound pressure level*). Il faut aussi noter des fatigues sonores chez les musiciens — usure du capital auditif à partir de temps prolongés d'écoute à 80 dB et au-delà. Les écouteurs ou smartphones contribuent également à ce phénomène.

précise et ses répercussions sur les structures voisines.

Une prévention tout au long de la vie

Au travail et dans la vie privée, l'exposition aux bruits est un facteur de risque majeur d'apparition de troubles de l'audition. C'est pourquoi il est important, dès le plus jeune âge, de préserver ses oreilles *(lire l'encadré ci-dessus)*. Même s'il existe une grande variabilité individuelle, l'intensité et la durée d'exposition aux bruits peuvent entraîner des pertes auditives irréversibles, bien souvent insidieuses au départ. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) recommande une limite maximale d'exposition au bruit de 85 dB sur le lieu de travail pendant huit heures par jour. À 100 dB, l'exposition ne doit pas durer plus de quinze minutes pour prévenir tout risque.
Certains signaux d'alerte existent pourtant : bourdonnements dans les oreilles, sifflements aigus... Ces acouphènes doivent amener à consulter car ils peuvent être le signe d'un début de surdité. De même qu'un phénomène d'hypersensibilité aux bruits, appelé hyperacousie. Avec les récents progrès techniques des aides auditives, il n'y a plus aucune raison de ne pas s'équiper à temps. ■ **É. G.**

SYMPTOMES

Énigmatiques acouphènes

Bourdonnements, sifflements, sons parasites... Les acouphènes sont des bruits perçus alors qu'ils n'existent pas dans l'environnement. Ils sont dus à une atteinte de l'oreille moyenne ou interne suite à un traumatisme, aux effets secondaires d'un médicament, à un dysfonctionnement du nerf auditif ou du cerveau lui-même. Les acouphènes perturbent l'audition, peuvent entraîner une intolérance aux bruits (hyperacousie) et être très invalidants sur le plan psychique. Il n'existe pas de traitement efficace à ce jour mais pour les personnes les plus atteintes, des thérapies acoustiques d'habituation (TAH) ou des thérapies cognitivo-comportementales (TCC) peuvent être envisagées avec un psychologue spécialisé, afin de « reprogrammer » le cerveau pour qu'il ne perçoive plus les acouphènes. ■ **É. G.**

PUBLICITÉ

Télomères et longévité

En 2009, trois chercheurs américains se sont vu décerner le Prix Nobel de Médecine pour leurs travaux exceptionnels en biologie et génétique, qui ont permis la compréhension des mécanismes de protection de l'ADN au cœur des cellules.

Genèse d'une découverte

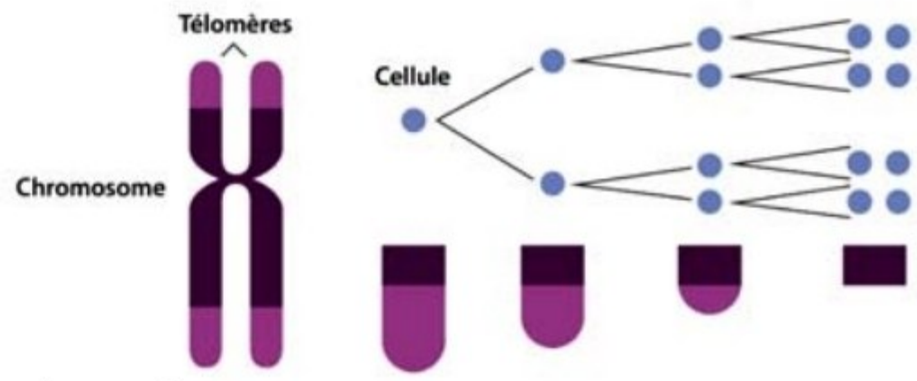
Le mot télomère vient du grec telos (fin) et meros (partie).

Dans les années 80, Elizabeth Blackburn est professeur de biologie à l'Université de Californie. Elle collabore avec Carol Greider, professeur de biologie moléculaire et Jack Szostak, professeur de génétique, afin d'étudier les mécanismes de protection et de réparation des chromosomes lors de la mitose cellulaire. Leurs travaux cherchent à expliquer comment les divisions cellulaires successives peuvent s'enchaîner sans que les chromosomes ne fusionnent entre eux ou ne s'abiment.

Mitose cellulaire et réplication des chromosomes

Les cellules de l'organisme se reproduisent régulièrement par un processus de division appelé mitose, la cellule initiale se scindant en deux cellules filles identiques qui contiennent le même matériel génétique. Il se produit pas moins de deux trillions de mitoses dans le corps humain chaque jour, ce qui permet de remplacer les cellules mortes ou abimées. Ce grand nombre fait supposer la survenue d'erreurs, c'est pourquoi les chercheurs ont émis l'hypothèse d'un système de protection des chromosomes.

Deux découvertes en une : télomères et télomérase



Les télomères raccourcissent à chaque division cellulaire

Situés aux extrémités de chaque chromosome, les télomères jouent un rôle de protection au moment de la séparation du matériel génétique. En effet à chaque division, ils raccourcissent légèrement, « sacrifiant » leur intégrité pour protéger celle des chromosomes. Le raccourcissement progressif des télomères finit par provoquer la mort de la cellule, appelée sénescence.
Les trois scientifiques ont également identifié une enzyme, baptisée télomérase, capable de rallonger les télomères et donc de prolonger la vie des cellules. Ils ont remarqué que cette enzyme n'était active que dans les cellules souches et germinales.
Plus le nombre de de cellules sénescentes est grand, plus le vieillissement de l'organisme accélère : la longévité est donc directement liée à la longueur des télomères.

Astragale et télomères,

Des scientifiques se sont intéressés à la racine de l'Astragalus membranaceus, une petite fleur très utilisée en médecine traditionnelle comme tonifiant et immunostimulant. Ils ont mis en évidence que ses propriétés étaient dues à deux composés, appelés cycloastragenol et astragaloside IV, qui avaient la capacité de réactiver la télomérase dans les cellules. Après plusieurs années de développement, le laboratoire français PhytoResearch a mis au point une formule naturelle basée sur les résultats de ces avancées scientifiques. Telomerys associe un extrait concentré de racine d'Astragalus membranaceus à du resvératrol, un puissant antioxydant, ainsi que des vitamines A, C et E. Formule anti-âge inédite, deux gélules par jour suffisent pour constater une diminution significative des rides, une amélioration des fonctions cognitives (mémoire, concentration) et un regain d'énergie.

Disponible en pharmacie et espace diététique

Telomerys
60 gélules végétales
ACL 6024256
Des questions ?
Les experts du Laboratoire PhytoResearch sont à votre écoute au 01 84 24 12 05 (tarif local) et sur **www.telomerys.com**.

Les nouvelles solutions pour mieux entendre

Aides auditives connectées, intelligence artificielle, thérapie génique : les moyens se multiplient pour fournir des alternatives aux pertes d'audition.

Miniaturisés, truffés d'électronique, dopés aux algorithmes d'intelligence artificielle (IA), les quelque 600 aides auditives actuellement sur le marché rivalisent techniquement pour tenter de reproduire au plus près un confort d'écoute. Au plus près car, contrairement aux lunettes qui corrigent exactement la perte visuelle, ces dispositifs ne peuvent que compenser une déficience de l'audition, dont le mécanisme se révèle très complexe. Impossible pour l'heure de la restituer à l'identique !

Ces aides se composent de trois éléments de base : un microphone qui capte les bruits, un processeur interne qui traite le signal et un haut-parleur qui envoie les sons dans le conduit auditif. Si la miniaturisation a permis de rendre de moins en moins visible le dispositif, c'est au niveau du processeur que se concentrent désormais la plupart des innovations. L'enjeu de ces avancées ? Gommer les multiples bruits de fond dont les interférences transforment encore trop souvent les sons amplifiés en « bouillie ». Pour ce faire, les processeurs existants ont d'ores et déjà une capacité moyenne de calcul supérieure à celle de l'ordinateur de bord du module lunaire d'Apollo 11 pour traiter les signaux reçus et discerner paroles et sons familiers ! Et cette puissance va être décuplée par les nouvelles générations de prothèses, désormais connectées au *cloud* pour multiplier la capacité de calcul et la puissance des microprocesseurs. Leurs algorithmes sont capables non seulement de reconnaître précisément les voix dans des environnements très saturés ou à 360 degrés, mais aussi de sélectionner directement les sons jugés pertinents en analysant les habitudes d'écoute du porteur. De quoi rendre l'assistance à la fois plus naturelle et plus instinctive. Et lever une partie des freins qui dissuadent encore beaucoup de malentendants de s'appareiller. ■ **R. de C.**

Des aides auditives plus intuitives…

Si elles affinent de plus en plus la qualité des sons qui arrivent aux oreilles, les technologies dites de débruitage peinent encore à reconnaître ceux sur lesquels l'attention de la personne appareillée se focalise. Cette perception cognitive du bruit commence pourtant à se développer. Plusieurs modèles récents, enrichis en intelligence artificielle, proposent d'accentuer automatiquement les sons les plus familiers grâce à une analyse continue des habitudes du porteur, voire de configurer automatiquement les types d'écoute en fonction des environnements sonores. Le couplage à la perception cognitive pourrait aller au-delà, plusieurs équipes travaillant d'ores et déjà sur des aides auditives directement connectées… au cerveau. Les sons sur lesquels se porte l'attention y sont en effet encodés spécifiquement. Le prototype Cognitive Hearing Aid, développé à l'université Columbia (États-Unis), permettrait de scanner en dix secondes les ondes du cortex auditif pour amplifier les sons qui stimulent l'attention. Le programme européen Cocoha annonce également d'ici cinq à dix ans des aides auditives intégrant des électrodes capables de capter ces signaux neuronaux pour amplifier naturellement les sons ciblés. D'autres équipes travaillent sur des modèles de senseurs intégrés (dans l'aide auditive) qui pourraient se caler sur les mouvements oculaires. Là où le locuteur porterait son regard, les micros de l'aide auditive capteraient aussitôt les sons émis en provenance de cette direction.

Reliées directement à un smartphone, certaines aides auditives peuvent désormais servir aussi de traducteur instantané ou de gyroscope.

SDP

… et plus connectées

La plupart des dispositifs intra-auriculaires ou déportés *(lire l'encadré p. 84)* permettent déjà de se connecter à un smartphone ou à une tablette. Mais la connectique devrait vite multiplier les services associés et transformer les appareillages en centrales high-tech. Sorti en mars 2019, le modèle Livio AI du fabricant Starkey intègre, pêle-mêle, un traducteur en 27 langues qui permet d'avoir les phrases directement traduites dans l'oreille, un assistant virtuel qui répond aux questions posées dans le micro de l'aide ou un gyroscope qui participe à la détection de chutes. D'autres modèles, comme ceux de technologie OPN

QUAND

VOUS REFERMEZ

UN

UNE NOUVELLE VIE

S'OUVRE À LUI.

EN TRIANT VOS JOURNAUX,
MAGAZINES, CARNETS, ENVELOPPES,
PROSPECTUS ET TOUS VOS AUTRES
PAPIERS, VOUS AGISSEZ POUR UN MONDE
PLUS DURABLE. DONNONS ENSEMBLE
UNE NOUVELLE VIE À NOS PRODUITS.

CONSIGNESDETRI.FR

CITEO

Le nouveau nom d'Eco-Emballages et Ecofolio

PHANIE

Conduit par l'ORL, le bilan auditif permet d'identifier les premiers signes de gêne auditive. Seul un tiers des Français l'ont effectué.

Les règles pour bien réussir son appareillage

Quand consulter ?

Dès les premiers signes de gêne auditive — généralement à partir d'une perte de 30 dB. Avant de prescrire l'appareillage, l'ORL vérifie que la déficience auditive ne masque pas une autre pathologie. Il adresse ensuite le patient au réseau d'audioprothésistes où se fera le choix de l'appareillage.

Quel appareillage ?

Les modèles existants couvrent les surdités légères (80 % des cas d'appareillages), sévères ou profondes. Trois grands types de matériel sont proposés. Les contours classiques à piles — les plus anciens et souvent les moins chers — sont peu discrets mais plus faciles d'usage. Les contours avec écouteur déporté sont désormais équipés de batteries rechargeables. Plus discrets avec leur microboîtier externe glissé derrière l'oreille, ils représentent 70 % des ventes en France. Dernière option : les intra-auriculaires, moulés sur mesure et glissés directement dans le conduit. Quasi invisibles, ils demandent un entretien contraignant et ne s'adaptent pas à toutes les morphologies. Quel que soit le modèle retenu, il faut veiller à ce qu'il soit homologué ! Une précaution qui vaut particulièrement pour les assistants d'écoute préréglés, commercialisés à prix cassés sur Internet et en grandes surfaces. D'une puissance maximale de 20 dB, ils sont intéressants en dépannage ou pour se familiariser avec les appareillages. Mais ils ne constituent pas une solution auditive durable.

Quel spécialiste ?

Si l'ORL est l'expert de l'oreille, l'audioprothésiste est celui de l'équipement. Il doit effectuer le réglage de l'appareil au plus près des problèmes rencontrés et des habitudes de vie, car le confort auditif est également un enjeu psychosocial. L'adoption d'un équipement débute par une phase de prêt afin que l'utilisateur puisse s'accoutumer au modèle retenu. Puis, un contrôle régulier, tous les six mois, permet son ajustement et son entretien. ■ **R. de C.**

d'Oticon, promettent une mise en réseau élargie avec les objets connectés — jusqu'au pilulier électronique synchronisé à l'aide auditive pour rappeler qu'il est l'heure de prendre ses médicaments. Le monitoring médical pourrait également se faire directement depuis l'oreille. Les mesures à distance de la température, de la tension ou de l'activité cardiaque seraient assurées par les prothèses. Le suivi des appareillés pourra également se faire à distance grâce à des services de télé-audiologie. Réglages du dispositif sans avoir à se rendre en magasin, mais aussi réalisation de diagnostics et audiogrammes sans se déplacer. Les premiers programmes tests en France ont été lancés en 2016. Reste à s'assurer de la sécurité de ces appareils qui concentrent de multiples données personnelles.

Des implants mieux tolérés

Quand la perte auditive est trop importante, l'appareillage ne suffit plus. Il faut alors passer aux implants. Posés par voie chirurgicale sur le nerf auditif, ceux-ci se composent d'un microphone extérieur qui capte les sons et d'électrodes qui les adressent directement aux terminaisons nerveuses du cerveau (aires auditives) à la place du conduit auditif défaillant. Cette technologie a fait d'importants progrès ces dernières années, les indications incluant désormais les enfants à partir de 12 mois et certaines surdités sévères pour lesquelles une audition résiduelle demeure. Néanmoins, l'intervention peut provoquer des fibroses (réactions traumatiques et inflammatoires), et le confort d'écoute restauré par ces implants reste limité. Des travaux de thérapie génique tentent de limiter ces contraintes, notamment en couplant les implants traditionnels avec des techniques de luminothérapie. Des chercheurs de l'université de Göttingen (Allemagne) travaillent ainsi à stimuler les neurones auditifs, en leur introduisant un gène sensible à la lumière. À terme, cela démultiplierait les points de contact des implants, qui ne peuvent en l'état contenir qu'une vingtaine d'électrodes, et pourrait également stimuler les neurones par la lumière.

Les promesses de la thérapie cellulaire

Si aides et implants compensent les déficiences, ils ne les réparent pas. L'avenir de l'audiologie passe donc par le développement de traitements capables de préserver et régénérer des cellules ciliées endommagées. Pendant longtemps, les chercheurs se sont intéressés aux oiseaux et aux reptiles, deux familles d'êtres vivants qui reconstituent naturellement leurs cellules ciliées, contrairement aux mammifères. Aujourd'hui, l'espoir semble plutôt venir de l'essor des thérapies cellulaires. L'équipe du Pr Marcelo Rivolta à l'université de Sheffield (Royaume-Uni) a ainsi réussi à restaurer l'audition de rongeurs à l'aide de cellules souches. De premiers traitements pour certaines surdités profondes sont annoncés d'ici à dix ans. De son côté, la start-up montpelliéraine Sensorion travaille sur un candidat-médicament (SENS 401) capable d'inhiber l'apoptose, autrement dit la mort, des cellules ciliées. En cas de choc acoustique et de surdité brutale, un tel traitement, en urgence, pourrait préserver une partie de l'audition. ■ **R. de C.**

Sur une proposition du ministre de la ville et du logement, le gouvernement et Action Logement acteur prioritaire de référence du logement social, proposent un beau cadeau aux français de plus de 70 ans.
Constatant que l'âge venant, la chute dans la salle de bains est très dangereuse, Action Logement propose, pour diminuer ce risque, de prendre en charge jusqu'à 5.000€ par foyer* pour la rénovation de la salle de bains.
Un vrai cadeau.

Avec

Kinemagic

évitons les chutes

Tel : 0800 05 06 07. (appel gratuit) I kinemagic.fr
Adresse : Kinedo. 9 rue de Rouans. 44680 Chaumes-en-Retz

(*) sous réserve de certaines conditions

DÉTECTION L'objet capté est reconnu comme étant un visage. L'opération est préalable à une authentification ou une identification.

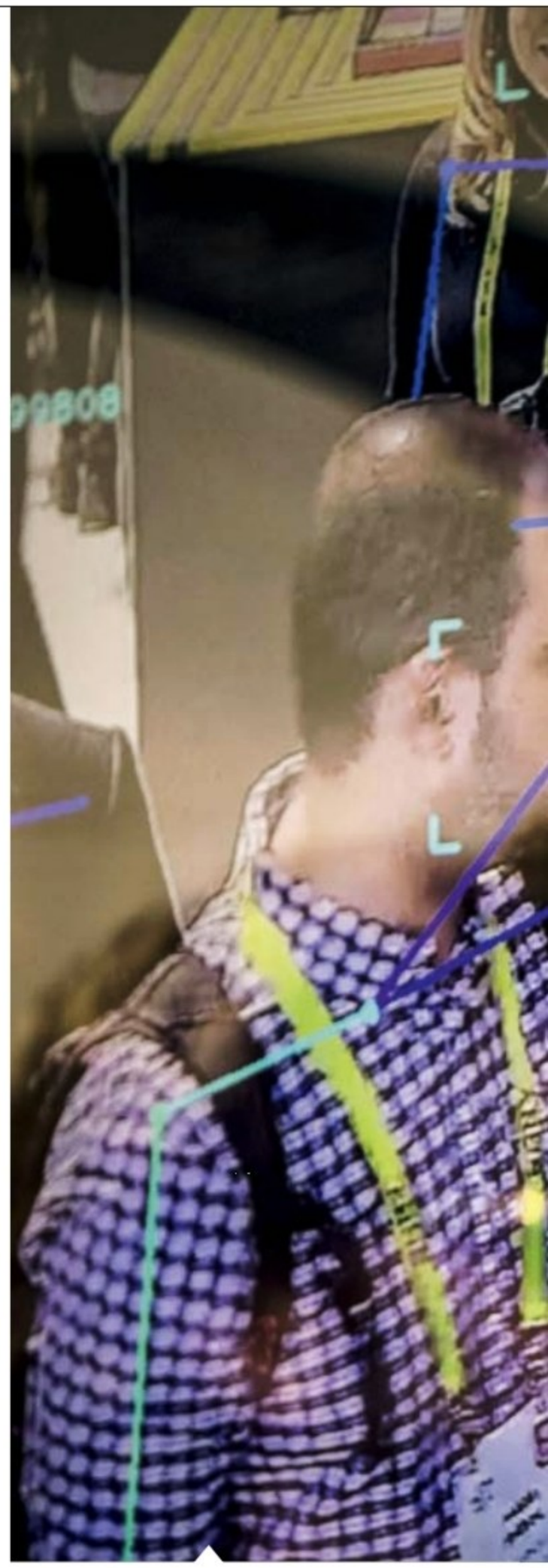
AUTHENTIFICATION Contrôle et validation (ou non) de l'identité d'une personne par comparaison de son visage avec ses données biométriques.

IDENTIFICATION Comparaison d'un visage inconnu avec une base de données de personnes identifiées pour vérifier s'il y est enregistré et sous quel nom.

Les zones d'ombre de la reconnaissance faciale

Entre fascination, polémiques, enjeux politiques et économiques, la technologie issue de la recherche en vision par ordinateur permet diverses applications. Mais c'est la surveillance qui inquiète le plus, pour des performances loin d'être optimales.

Par Arnaud Devillard @A_Devila



À partir d'un scan du visage, l'algorithme en extrait les caractéristiques les plus marquantes pour établir un gabarit.

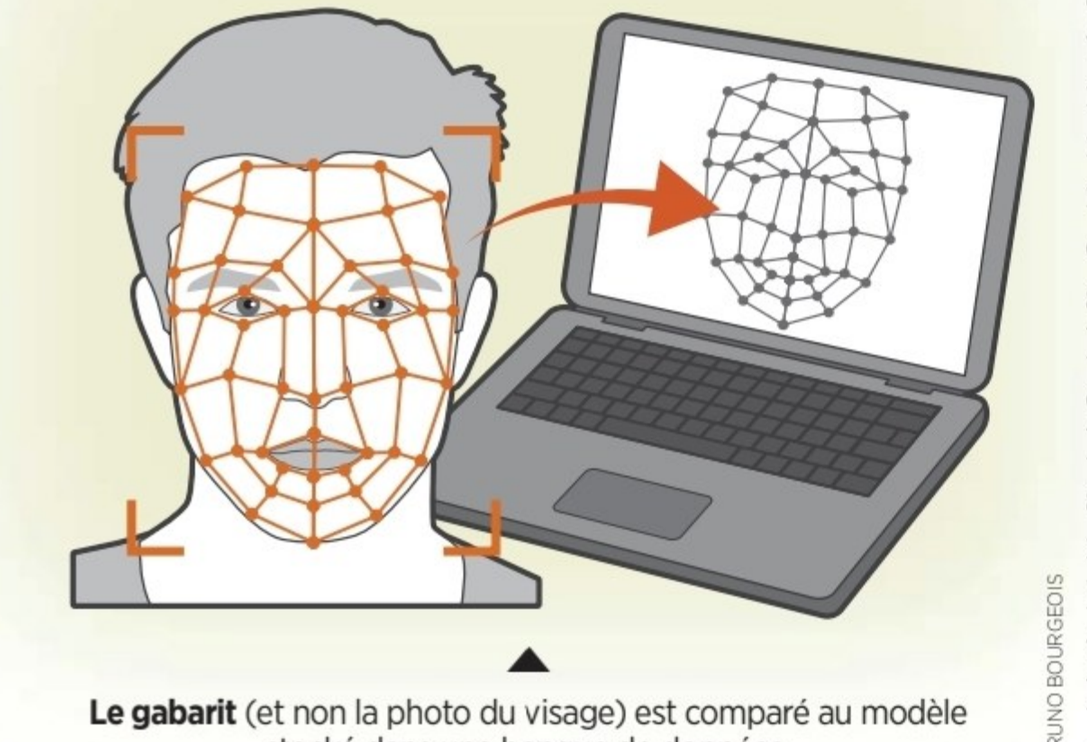
LES ANNONCES se succèdent et font sensation depuis quelques mois : après l'expérimentation d'une technologie de reconnaissance faciale lors du carnaval de Nice en février 2019, la région Provence-Alpes-Côte d'Azur a voulu instaurer dans deux lycées un contrôle d'accès par scannage des visages, sa demande étant aussitôt retoquée par la Commission nationale de l'informatique et des libertés (Cnil). Quelques semaines plus tard, en mai, c'est au tour du gouvernement de publier le décret d'application sur la mise en place d'Alicem (Authentification en ligne certifiée sur mobile), qui doit permettre à terme de s'identifier par reconnaissance faciale sur les sites officiels. Face aux critiques, le déploiement prévu pour 2019 a été repoussé et l'application est toujours en phase de test. Puis Cédric O, le secrétaire d'État au numérique, annonce la création d'une « *instance de supervision et d'évaluation* » de ces technologies, évoquant une « *phase d'expérimentation de six mois à un an* ». La Cnil, qui a donné son accord à l'initiative du gouvernement, demande par ailleurs l'ouverture d'un débat national. C'est peu dire que la technologie de reconnaissance faciale, qui s'est développée au rythme échevelé des avancées de l'intelligence artificielle, fait débat.

Les applications sur le terrain, en France ou dans le monde, sont en effet disparates et loin de faire l'unanimité. Ainsi, fin avril 2018, lorsque la police de New York (États-Unis) tente d'identifier un voleur sur les images de vidéosurveillance d'un magasin, le système de reconnaissance faciale dont elle est équipée est mis en échec. Trop sombres et trop pixellisés, les images se révèlent inexploitables. Mais jugeant que le délinquant ressemble à l'acteur Woody Harrelson, les policiers soumettent une photo haute définition de la

117 millions
Le nombre d'Américains (sur 320 millions) qui seraient fichés dans les bases de données de reconnaissance faciale.

1,3 milliard
Le nombre de Chinois (la quasi-totalité de la population) qui auront à terme leur visage stocké dans une base de données selon un programme du ministère de la Sécurité publique lancé en 2015.

JOE BUGLEWICZ/THE NEW YORK TIMES/REDUX/REA



Le gabarit (et non la photo du visage) est comparé au modèle stocké dans une banque de données.

BRUNO BOURGEOIS

star de *Hunger Games* à leur système... et obtiennent une liste de noms de suspects plus ou moins ressemblants qui les mènera à l'arrestation du coupable. Sur la foi d'une photo qui n'était donc pas la sienne... Deux semaines plus tard, la ville de San Francisco choisit quant à elle de bannir l'usage de la reconnaissance faciale par ses services dont la police. Une première aux États-Unis ! La ville de Portland, dans l'Oregon, a aussitôt annoncé vouloir lui emboîter le pas, en étendant la mesure au secteur privé, tandis que celle de San Diego admettait en janvier que la technologie n'avait permis aucune arrestation... en six ans d'utilisation. Néanmoins, de l'autre côté de la planète, les autorités chinoises la généralisent dans le métro de Pékin et l'utilisent dans d'autres villes pour dénoncer nommément, sur écran géant, les passants coupables d'incivilités. Elles ont également imposé que toute souscription à un service de téléphonie mobile soit soumise à un scan de visage.

Pourtant, la reconnaissance faciale n'a pas connu de réel bond tech-

O. ERTZSCHEID

INTERVIEW

OLIVIER ERTZSCHEID
MAÎTRE DE CONFÉRENCES EN SCIENCES DE L'INFORMATION ET DE LA COMMUNICATION À L'UNIVERSITÉ DE NANTES

« Nous sommes entrés dans une société de surveillance »

Y a-t-il eu un saut technologique récent en reconnaissance faciale pour qu'elle suscite tant d'attention ?
Pas vraiment. En revanche, des enjeux économiques très forts poussent cette technologie en avant, davantage même que les enjeux politiques. Des acteurs technologiques cherchent à la rendre de plus en plus acceptable par la population.

Il existe une variété d'usages, du déverrouillage d'un smartphone aux enquêtes de police. A-t-on affaire à chaque fois à la même technologie ?
Oui, avec des variantes, mais les algorithmes fonctionnent selon les mêmes principes. En fait, chaque échelle d'usage vient légitimer la suivante, pour faire en sorte que la reconnaissance faciale relève d'une utilisation routinière : déverrouiller un smartphone en présentant son visage à la caméra ou savoir qui se présente à la porte avec la sonnette connectée Ring d'Amazon par exemple. Or — ce que nombre d'utilisateurs ignorent — c'est que Ring a noué des partenariats avec des polices locales américaines ! Tout comme ils ignorent que, aux États Unis, le FBI et l'ICE (douanes et immigration) scannent les photos des fichiers de permis de conduire. Nous sommes vraiment entrés dans une société de surveillance.

Ces outils sont-ils performants ?
Oui et non. Oui, parce que des expérimentations et des pratiques montrent que détecter finement des visages est devenu plus facile. Mais il existe quantité de contre-exemples, dus au problème récurrent de données d'entraînement incomplètes, manquant de diversité, biaisées. C'est pour cela qu'une société chinoise [CloudWalk] est en train de développer un outil pour le Zimbabwe, qui lui ouvre ses bases de données. Elle peut ainsi entraîner ses algorithmes sur des morphotypes africains, pour lesquels la Chine manque de références, afin de proposer ses outils à d'autres pays d'Afrique. ■

Propos recueillis par A. D.

nologique ces derniers mois. Son principe reste le même : lors du scan d'un visage, l'algorithme en extrait les caractéristiques les plus saillantes, nommées les points de gradient. Il établit alors un gabarit, stocké sur une base de données. Pour identifier ensuite une personne lors d'un contrôle, l'algorithme ne compare donc pas deux images entre elles mais deux gabarits : l'un est calculé « en direct » à partir de la personne présente devant la caméra ou de sa photo, l'autre est extrait de la base. « *Le seul véritable saut technique est la possibilité d'avoir désormais des bases de données annotées*, explique Jean-Luc Dugelay, chercheur à l'école d'ingénieurs Eurecom à Sophia-Antipolis (Alpes-Maritimes). *Celles-ci sont constituées d'un grand nombre d'exemples de visages d'une même personne, avec mention de l'âge et du sexe, par exemple. Sans annotation, la machine ne réussira pas grand-chose.* » Pas étonnant que les acteurs principaux du domaine se nomment Google, Amazon, Facebook et Microsoft (États-Unis) ou Baidu (Chine), autrement dit des géants d'Internet disposant à la fois des technologies et des données massives pour entraîner les algorithmes.

La technologie plus efficace sur les smartphones

Du point de vue des usages, contrairement à une idée reçue, la vidéosurveillance n'est pas le moteur principal des recherches en la matière. « *Les caméras ne sont pas équipées des meilleurs capteurs existants*, poursuit Jean-Luc Dugelay, *car les villes qui ont fait ce choix n'ont souvent pas les moyens de remplacer leurs équipements. D'autant que, pour être efficace, le parc de caméras doit être homogène.* » Ce sont donc les smartphones les plus performants, certains modèles pouvant désormais se déverrouiller après scannage du visage de leur propriétaire. Les grandes multinationales comme Apple, Samsung ou LG poussent donc fortement au développement de ces technologies partout où cela est possible.

Accélérer les contrôles aux frontières

Ainsi, en France, au passage de la frontière des aéroports d'Orly, Roissy et Marseille-Provence ou pour emprunter le tunnel sous la Manche, la reconnaissance visuelle sert aux autorités à authentifier sur place une personne déjà identifiée par son passeport. L'objectif principal n'est pas d'améliorer les contrôles mais de les accélérer afin de réduire les files d'attente (*lire* S. et A. *n° 868, juin 2019*). Le procédé devrait d'ailleurs être étendu cette année à l'embarquement à Orly, comme c'est déjà le cas dans plusieurs aéroports américains. C'est sur ce même principe que fonctionne l'application Alicem, poussée par le ministère de l'Intérieur et l'Agence nationale des titres sécurisés (ANTS), qui prévoit d'authentifier une personne par son passeport électronique et son visage capté en temps réel par le smartphone avant de lui autoriser l'accès aux sites de l'administration.
Alicem a d'emblée fait polémique. Points contestés, entre autres : le stockage de l'historique des démarches par l'ANTS et le fait que les gabarits ne sont pas comparés localement sur le smartphone mais momentanément sur les serveurs de l'agence. Ce qui laisse planer le soupçon qu'ils

POUR EN SAVOIR PLUS

- La conférence TEDx de Joy Buolamwini : **sciav.fr/877Buolamwini**
- Le rapport de la Ville de Nice sur son expérimentation : **sciav.fr/877Nice**
- Le rapport d'Inria : **sciav.fr/877Inria**

COREANA MUSEUM OF ART

JIP VAN LEEUWENSTEIN

SIPA

SANNE WEEKERS

PARADES

Déjouer le repérage

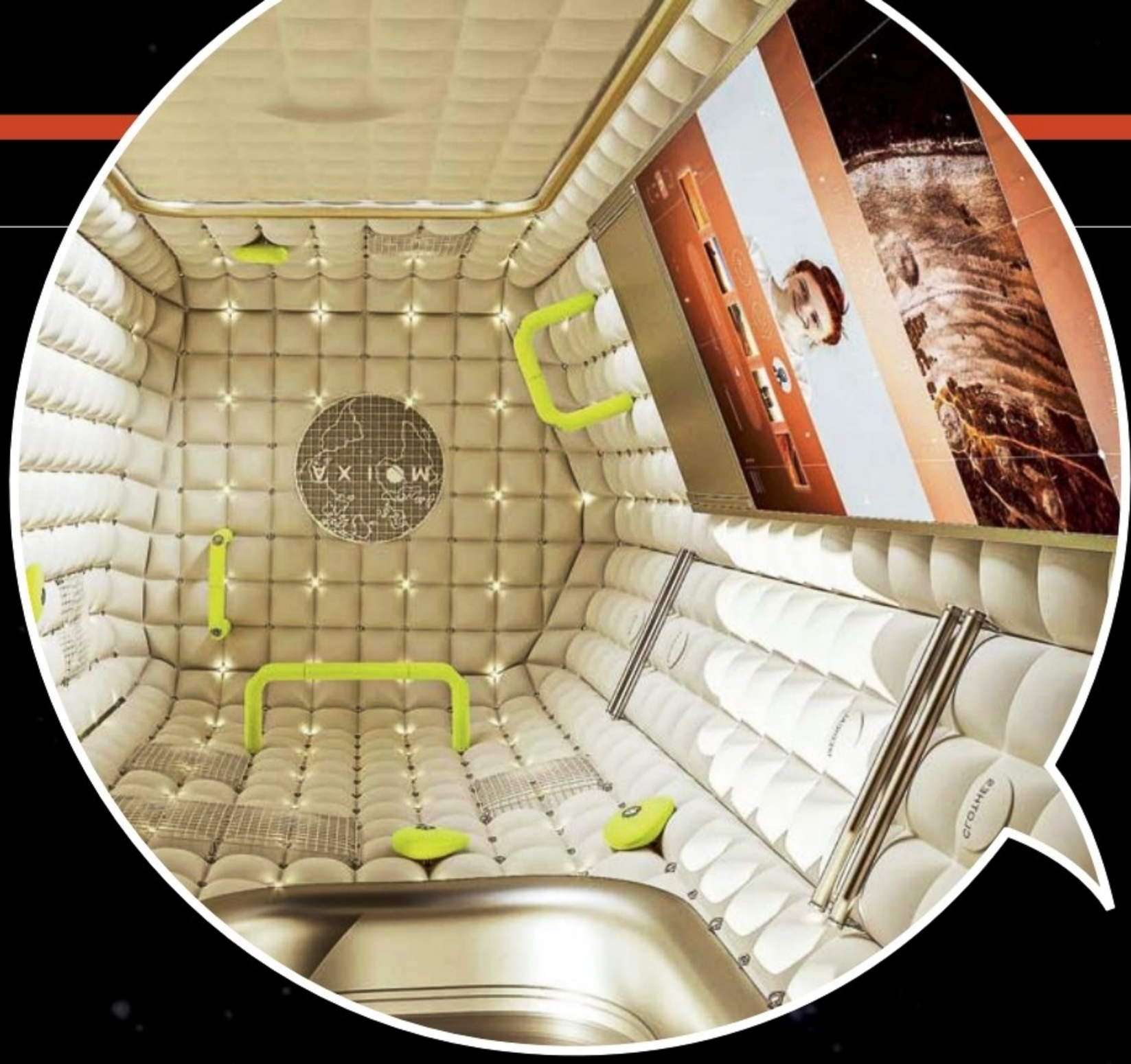
Entre maquillage ①, masque transparent et déformant ②, lunettes munies de diodes ③, foulard imprimé ④, les moyens de déjouer la reconnaissance faciale ne manquent pas. Deux chercheurs de l'université de Tel-Aviv (Israël) travaillant pour Facebook ont une approche plus technologique : utiliser la méthode des réseaux génératifs antagonistes (GAN). Sur une vidéo, y compris en temps réel, l'algorithme va rapprocher les yeux, changer des ombres, retoucher la bouche, le nez, sans toutefois rendre la personne méconnaissable. Mais elle le sera pour le système de reconnaissance scannant l'image.

pourraient venir « nourrir » une base de données centrale. Car c'est bien la surveillance et le travail policier qui préoccupent le plus les défenseurs de la propriété des données et des libertés individuelles, en raison de pratiques souvent opaques, qu'il s'agisse des données collectées, des droits d'accès ou de l'efficacité des outils. Après l'expérimentation de la reconnaissance faciale lors du carnaval 2019, les autorités niçoises ont ainsi envoyé un rapport à la Cnil qui — s'il a tout de l'auto-satisfecit — souffre de nombreuses zones d'ombre : aucune information sur le paramétrage du logiciel israélien Anyvision utilisé ni sur les éventuels « faux-positifs », ces personnes confondues avec d'autres. En outre, les réseaux dits de neurones convolutifs sur lesquels sont fondés ces outils sont loin d'être infaillibles. Des expériences ont montré qu'il suffit de modifier quelques pixels dans une image déjà connue de l'algorithme pour faire échouer la reconnaissance *(lire l'encadré ci-contre)*. « *Tant qu'il n'existera pas un socle commun dans les technologies d'IA, la machine ne sera jamais à l'abri d'erreurs aussi élémentaires* », prévient Antoine Bordes, directeur de la branche parisienne du laboratoire de recherche en intelligence artificielle de Facebook.

Le manque d'entraînement des algorithmes pointé

Si ces défaillances peuvent *a priori* se corriger au fil des progrès de la technologie, la question des données d'entraînement reste cruciale. Du degré de diversité des visages auxquels auront été confrontés les algorithmes, découle l'existence ou non de biais (raciaux, de genre, d'âge, etc.). Un phénomène révélé lors d'une conférence choc en 2016 par Joy Buolamwini, chercheuse au Massachusetts Institute of Technology (Cambridge, États-Unis) , qui a montré comment son visage d'Afro-Américaine n'était fréquemment pas détecté par les systèmes de reconnaissance faciale, comme s'il n'existait pas, trahissant le manque d'entraînement des algorithmes sur des visages de femmes noires.

De son côté, l'Union américaine pour les libertés civiles (ACLU) a pointé du doigt en 2018 la technologie Rekognition d'Amazon. Lors d'un test, celle-ci a en effet identifié à tort 28 membres du Congrès américain parmi 25 000 photos de délinquants figurant dans la base d'identités judiciaires ! *Idem* avec des photos d'élus californiens ou des sportifs de Boston. Un argument récurrent voudrait que « *si on n'a rien à se reprocher, on n'a rien à craindre* ». En l'occurrence, chacun peut au moins craindre d'être inexistant ou confondu avec un criminel. ■



MODULES D'HABITATION
Les espaces de vie — quartiers de l'équipage, salle à manger et cuisine — ont été imaginés par le designer français Philippe Starck. Les parois seront équipées de centaines de nanoleds, dont les couleurs varieront en fonction du paysage terrestre, visible grâce à de larges hublots.

En orbite, dans un hôtel 5 étoiles

La Nasa envisage de doter la Station spatiale internationale d'une dépendance commerciale. Cet hôtel spatial devrait ensuite s'en détacher pour poursuivre seul son vol.

Envie d'une chambre avec vue sur Terre depuis 400 km d'altitude ? Ce fantasme devrait être réalisable pour une poignée de richissimes curieux et de professionnels — chimistes, industriels, ingénieurs voulant mener des expériences en absence de gravité — à partir de 2024. Dans cette perspective, la Nasa a choisi la société privée américaine Axiom Space pour construire une dépendance commerciale de la Station spatiale internationale (ISS). Cette annexe composée de trois blocs sera d'abord arrimée au module Harmony. Mais ensuite, l'hôtel spatial est voué à survivre à la station : lorsque l'ISS sera démantelée, il se détachera et poursuivra seul son vol en orbite. Il sera alors complété par des éléments, destinés à lui fournir de l'énergie électrique et thermique. Un sas de sortie extravéhiculaire est aussi prévu. Lorsque la station sera complète, en 2028, elle disposera de deux modules d'habitation pouvant accueillir jusqu'à 16 astronautes, qui disposeront d'espaces de vie et de travail. Une première étape vers cette construction a été annoncée en mars : SpaceX, la société du milliardaire américain Elon Musk, lui fournira un lanceur et la capsule habitée Crew Dragon. Axiom Space programme un premier vol entièrement privé vers l'ISS en 2021. Le prix du billet pour 10 jours en orbite est fixé à 55 millions de dollars ! ■

Sylvie Rouat @srouat1

AXIOM SPACE - AFP

MODULE ÉNERGIE
Il fournira à la station autonome une puissance électrique et thermique équivalente à celle de l'ISS.

SAS DE SORTIE EXTRAVÉHICULAIRE
Il permettra, à partir de 2027, d'accéder au milieu spatial.

LABORATOIRE DE RECHERCHE ET DE FABRICATION
Ce module est destiné notamment à la bio-impression en microgravité. La présence permanente d'au moins un astronaute dans la station permettra de mener des projets de recherche au long cours.

OBSERVATOIRE TERRESTRE
Cette coupole aux parois de verre est annoncée comme *« le plus grand poste visuel jamais construit dans l'espace »*. Il permettra aux touristes et astronautes d'avoir une vue à 360° de notre planète.

L'INNOVATION À LA FRANÇAISE

L'hydrogène vert a le vent en poupe

La start-up Lhyfe inaugure un site industriel pilote pour produire de l'hydrogène à partir d'éoliennes. Une technologie qui permet de n'émettre aucune molécule de CO_2.

DERRIÈRE LA DIGUE, à l'abri des assauts de l'Océan, les huit éoliennes hautes de plus de 60 mètres ronronnent au-dessus des canaux et des polders de Bouin (Vendée). De l'eau, du vent et ces grands aérogénérateurs : tous les ingrédients dont a besoin la start-up Lhyfe sont là. L'entreprise nantaise prépare, en plein cœur du marais Breton, le lancement de la première production industrielle en France d'hydrogène « vert », c'est-à-dire produit à partir d'électrolyse de l'eau et d'énergie renouvelable. *« Nous commençons la construction de l'usine. Elle disposera d'un premier électrolyseur directement raccordé à une éolienne. Dès 2021, nous produirons 300 kg d'hydrogène par jour. De quoi alimenter 15 à 20 véhicules lourds ou 700 voitures »*, précise Matthieu Guesné, président fondateur de l'entreprise, ancien directeur du centre de recherche en énergie marine du CEA Tech Pays de la Loire. Et la start-up prévoit déjà de monter en puissance avec deux nouveaux électrolyseurs reliés à deux éoliennes soit une production de 900 kg d'hydrogène par jour en 2023. Certes, cela correspond encore à peine à quelques dizaines ou centaines de véhicules sur un parc français qui en compte près de 40 millions. Mais cet hydrogène vert est un objectif très convoité.

O. HERTEL

Le parc éolien de Bouin, en Vendée, proche de la mer, alimentera la future usine de production d'hydrogène vert.

L'électrolyse est en effet un procédé qui permet de casser les molécules d'eau (H_2O) pour obtenir de l'hydrogène (H_2) d'une part et de l'oxygène (O_2) d'autre part. L'opération exige de l'énergie électrique, habituellement fournie par le réseau. L'originalité de Lhyfe est précisément de faire appel aux éoliennes. Résultat : cette production n'émet pas la moindre molécule de CO_2. Un atout supplémentaire quand on sait qu'une voiture à pile à combustible, comme la Toyota Mirai ou encore la Hyundai Nexo, utilise l'hydrogène pour faire tourner son moteur électrique en ne rejetant que de l'eau.

Ce cercle vertueux souffre cependant encore d'un handicap majeur : *« Le coût de production de l'hydrogène vert est de l'ordre de 7 à 13 euros le kilogramme contre environ 1,50 euro pour l'hydrogène dit gris, fabriqué par l'industrie gazière à partir d'hydrocarbures comme le méthane »*, explique François Le Naour, responsable du Programme hydrogène au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA). Un tel écart a longtemps condamné le développement d'une industrie de cet hydrogène renouvelable. Mais la lutte contre le réchauffement climatique et la chasse aux émissions de gaz à effet de serre qui en découle change doucement la donne car la fabrication d'un kilo d'hydrogène à partir d'hydrocarbures émet plus de 10 kg de CO_2. Ainsi, la production de cet hydrogène gris en France, qui représente environ 900 000 tonnes par an, destinées essentiellement à l'industrie, génère à elle seule environ 11,5 millions de tonnes de CO_2. Soit près de 3 % des émissions nationales, comme le souligne le Plan de déploiement de l'hydrogène en France lancé par Nicolas Hulot en 2018, alors ministre de la Transition écologique et soli-

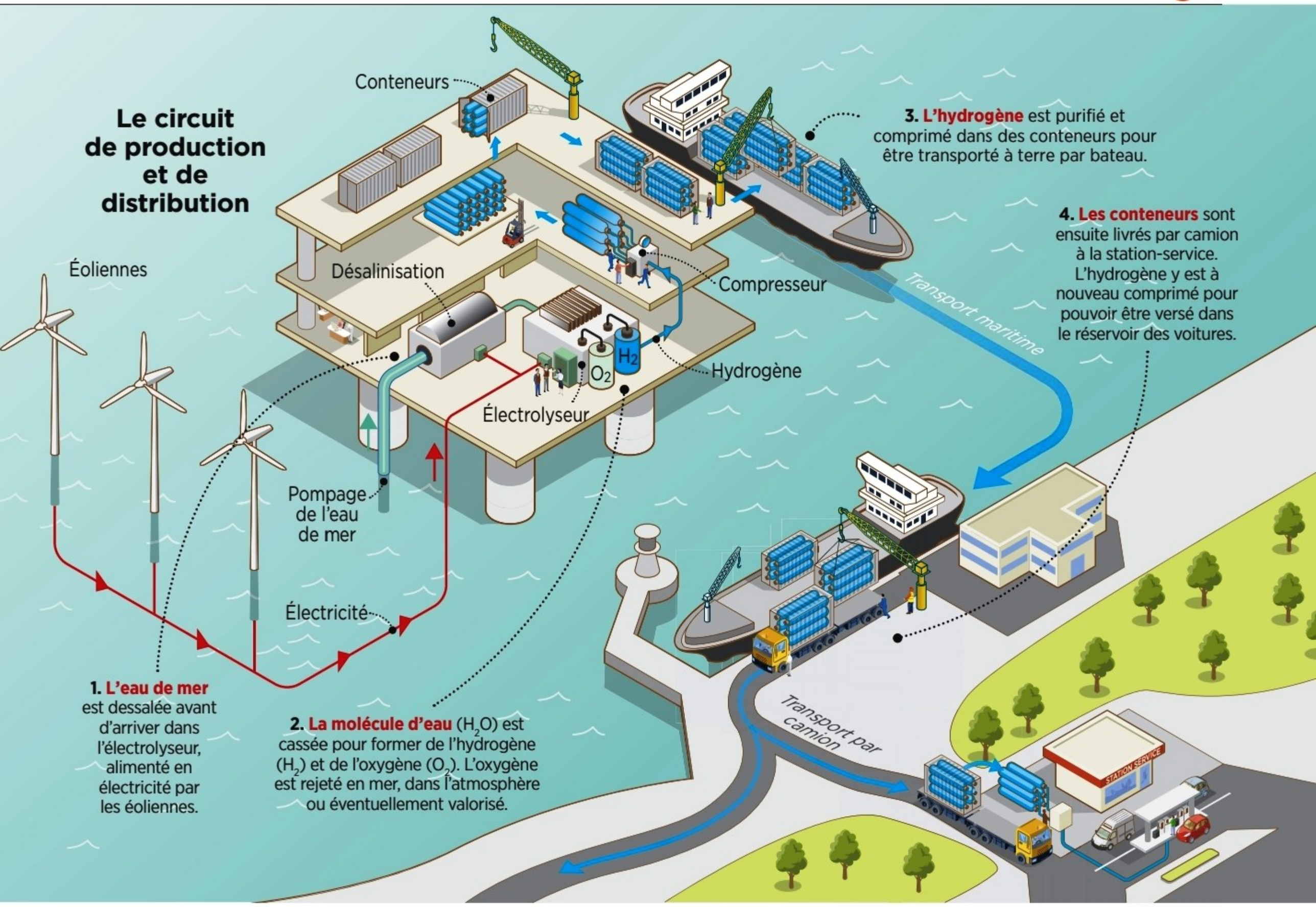
FICHE D'IDENTITÉ

L'entreprise

- **Lhyfe,** siège à Nantes (Loire-Atlantique).

Chiffres

- **15** salariés.
- **8 millions d'euros** de levée de fonds en octobre 2019.
- **300 kg** d'hydrogène seront produits en 2021 sur le site de Bouin (Vendée).



BRUNO BOURGEOIS

daire. Et c'est bien sur ce point que Lhyfe compte s'appuyer pour promouvoir sa production verte. Celle-ci sera distribuée par deux stations-service, l'une construite au Mans par l'Automobile club de l'Ouest qui organise les 24 heures du Mans, et l'autre à la Roche-sur-Yon, mise en œuvre par Vendée Énergie, société d'économie mixte créée par le Syndicat départemental d'énergie et d'équipement de la Vendée (SyDEV). Cet hydrogène est donc destiné dans un premier temps à des flottes captives locales, c'est-à-dire des véhicules qui reviennent à leur point de départ : bus, camions d'entretien des routes, bennes à ordures, véhicules de pompiers et autres véhicules de service. Ces premiers utilisateurs sont donc essentiellement des acteurs publics, prêts à payer leur carburant plus cher pour promouvoir une mobilité réellement verte. « *Quand une collectivité prend le risque d'utiliser de l'hydrogène gris, sachant tout le CO_2 qui a été émis pour le produire, elle s'expose à une levée de boucliers* », assure Matthieu Guesné.

O. HERTEL

« Notre objectif est de transposer notre modèle d'usine terrestre en mer. Le vent y est plus régulier et plus fort »

Matthieu Guesné, président fondateur de Lhyfe, Nantes (Loire-Atlantique)

Des premiers appels d'offres lancés en Allemagne

Mais le modèle économique de Lhyfe suscite encore des interrogations. « *Je pense qu'il est nécessaire de coupler l'alimentation en énergie éolienne avec le réseau électrique car la seule production des aérogénérateurs ne suffira pas. Pour amortir les investissements des électrolyseurs, il faut qu'ils fonctionnent 3000 à 6000 heures par an. Or, nous ne parvenons jamais à ces valeurs avec des énergies renouvelables en France* », estime François Le Naour. Une difficulté que n'ignore pas la start-up nantaise. « *Notre véritable objectif est de* ▶

transposer notre modèle d'usine terrestre, en mer, alimentée par des éoliennes offshore. Le vent y est plus régulier et plus fort. Or, la quantité d'énergie produite augmente avec le cube de la vitesse du vent. Ce qui signifie qu'une faible augmentation du vent moyen se traduit par une forte augmentation de l'électricité produite et donc de l'hydrogène », assure Matthieu Guesné qui s'appuie notamment sur l'exemple des éoliennes offshore de Dunkerque. Le coût de production du mégawattheure (MWh) y est de 46 euros contre 55 euros pour le nucléaire si l'on tient compte du coût du « grand carénage », ces travaux visant à prolonger la durée de vie des centrales. *« Les premiers appels d'offres pour des usines à hydrogène offshore alimentées par des éoliennes commencent à être lancés en Allemagne. Nous serons alors les premiers à avoir un site pilote industriel pour ce type de production à terre mais facilement transposable en mer »*, promet l'expert. L'entrepreneur assure aussi que d'autres appels d'offres pour ce type d'installations sont prévus au Danemark et en Écosse. Aux Pays-Bas, Shell et Gasunie prévoient de produire 800 000 tonnes d'hydrogène vert en 2040. Il compte aussi profiter d'un contexte global de plus en plus favorable pour l'hydrogène.

D'autres pays intéressés par la technologie

Si des constructeurs comme Toyota, Hyundai, Honda, Mercedes ont déjà des véhicules à hydrogène à leur catalogue, d'autres comme PSA ou BMW en auront d'ici à 2021. Et même si Herbert Diess, le patron du groupe Volkswagen qui a tout misé sur la batterie, a annoncé en septembre dernier lors du salon automobile de Francfort que la voiture hydrogène était un « non-sens », les dirigeants de son pays pensent le contraire. L'Allemagne prépare un nouveau plan hydrogène de grande ampleur pour l'industrie et les transports. Au programme, pas moins de 20 % d'hydrogène vert produit d'ici à 2030 grâce à trois à cinq gigawatts d'électrolyseurs et un investissement de 3,4 milliards d'euros dans le développement de stations-service. La Chine elle-même, championne incontestée des batteries, semble prendre le virage de l'hydrogène ! Wan Gang, ancien ministre de la Science et des Technologies, considéré comme le père de la voiture électrique à batterie en Chine, a ainsi annoncé en juin 2019 qu'il était temps de passer à la voiture à pile à combustible. Et quand la Chine s'éveillera... ■

Olivier Hertel

@OlivierHertel

HDF ENERGY

D'une capacité de 60 mégawatts, la centrale solaire de Mana, en Guyane, sera couplée à un stockage d'hydrogène qui permettra de produire de l'électricité en continu.

STOCKAGE

La plus grande centrale solaire à hydrogène

En 2022, la Guyane pourra se vanter d'abriter le plus grand site de stockage d'énergie renouvelable au monde. Et ce, surtout grâce à l'hydrogène. Le projet mené par la société Hydrogène de France, est composé d'une centrale solaire de 60 mégawatts (MW) de puissance, connectée au réseau électrique et associée à un stockage de 120 MWh dont 90 sous forme d'hydrogène et 30 sous forme de batteries. Le stockage sert à compenser l'intermittence de la production solaire. En effet, le simple passage d'un nuage au-dessus des panneaux photovoltaïques fait chuter brutalement la production. L'énergie emmagasinée intervient donc pour lisser ces variations. Problème : les batteries ne fournissent en général qu'une demi-heure à une heure de réserve, juste ce qu'il faut pour compenser les passages nuageux de la journée. L'hydrogène, produit par électrolyse de l'eau avec l'électricité fournie par la centrale, permet en revanche de réaliser 20 à 30 heures de stockage. De quoi tenir facilement toute une nuit. *« Nous pouvons ainsi délivrer du courant produit par une centrale solaire, pour 10 000 logements, de jour comme de nuit »*, explique Damien Havard, le P-DG d'Hydrogène de France.

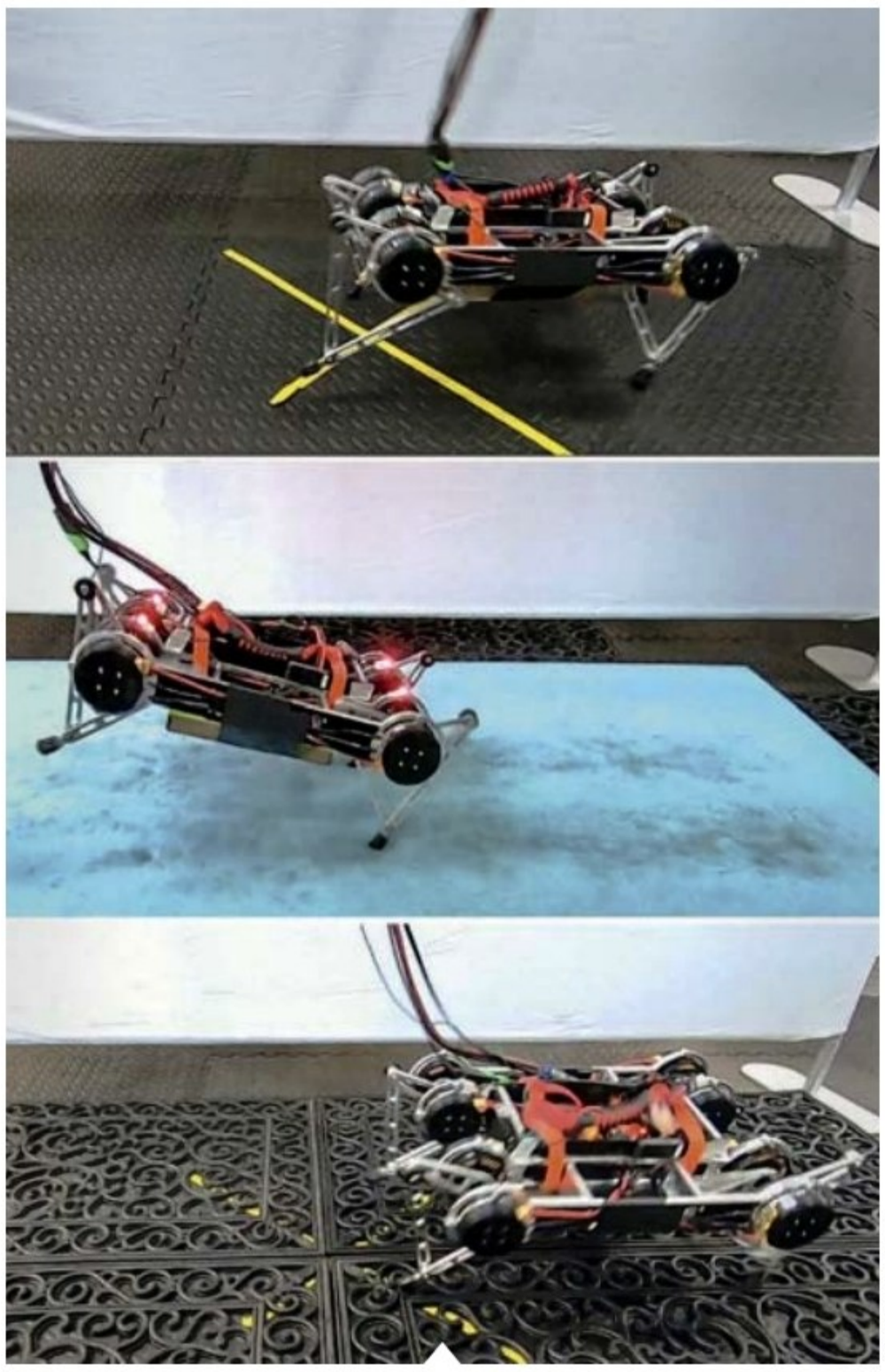
Un robot a appris tout seul à marcher

La machine est pilotée par une intelligence artificielle selon la méthode de l'apprentissage par renforcement. Elle n'a pas à reconnaître son environnement ni à identifier les obstacles.

LÈVE-TOI ET MARCHE ! C'est en substance l'ordre donné, sans autres instructions, à un petit robot quadrupède de 60 centimètres appelé Minitaur par une équipe de chercheurs du Georgia Institute of Technology, de l'université de Californie à Berkeley (États-Unis) et du département robotique de Google. Et au bout de quelques dizaines de minutes, le robot s'est exécuté ! L'objectif était qu'il parvienne seul à se déplacer en avant, en arrière et à tourner à droite ou à gauche au sein d'un périmètre donné. Son atout : être piloté par une intelligence artificielle (IA).

Grâce à la méthode dite de l'apprentissage par renforcement, l'IA n'a pas besoin de reconnaître son environnement ni d'identifier les obstacles. Il lui faut juste comprendre dans quelles conditions elle échoue à accomplir une tâche et dans lesquelles elle réussit. En essayant, en se trompant et en réessayant, recevant une « récompense » ou une « pénalité » selon le résultat obtenu. *« Dans cette étude, le critère d'évaluation est la distance parcourue par le robot en un temps donné*, explique Robbie Gonzalez, porte-parole des projets de recherche chez Google. *Un système de capture de mouvement suit le centre de gravité du robot et calcule la distance. »*

Ce type d'apprentissage nécessite une phase de simulation, avec un avatar virtuel de la machine s'entraînant dans un environnement également virtuel. Cela afin d'amorcer le mécanisme de la récompense et de la pénalité avant de passer aux expérimentations réelles. Ainsi, le Minitaur a su avancer, changer de direction et se relever après une chute au bout de soixante-douze minutes sur un terrain plat. Il ne lui a fallu « que » 135 essais et 60 000 pas pour en arriver là. Au bout de cinq heures et demie, il a pu progresser sur la surface molle d'un matelas. Même chose après quatre heures et demie passées à se confronter aux aspérités d'un paillasson. *« Notre système fait aussi en sorte que lorsque le robot s'apprête à sortir de son périmètre d'entraînement, il stoppe automatiquement et se remet en marche dans la direction opposée »*, continue Robbie Gonzalez.



SEHOON HA ET AL

Le Minitaur parvient à se déplacer
sur une surface plane (en haut), moelleuse (au centre) ou comportant des aspérités (ci-dessus).

Le quadrupède peut effectuer des tours sur lui-même

Les chercheurs notent, dans leur article en prépublication, que le quadrupède est même capable d'effectuer des tours sur lui-même mieux qu'un opérateur ne saurait lui faire faire en le pilotant à distance. Et une série de règles lui permettent de se redresser seul lorsqu'il bascule, évitant une intervention humaine (le robot est relié à un ordinateur qui lui fournit à la fois l'énergie et les capacités de calcul). En revanche, le robot est encore incapable de changer de surface, de passer du sol plat au paillasson dans un même mouvement, par exemple. Et il faut le dégager à la main lorsqu'il est coincé dans un angle qui l'empêche de s'orienter. ■

Arnaud Devillard @A_Devila

L'humain augmenté bombe le torse

Enfiler une armature de robot comme un simple accessoire vestimentaire pour multiplier son endurance et sa force : c'est le principe des exosquelettes. Des dispositifs qui séduisent l'armée mais aussi les médecins et les industriels.

PORTER UNE CHARGE de cent kilos sans effort, skier quatre fois plus longtemps sans s'épuiser, maintenir sans fatigue une position inconfortable : voici quelques-unes des promesses des exosquelettes, ces assistances placées au plus près du corps qui décuplent la force musculaire. Destinés à épauler les travailleurs réalisant des tâches physiquement éprouvantes ou encore les militaires, ces dispositifs ont aussi des applications en santé : ils permettent une rééducation en kinésithérapie, voire redonne à des personnes paralysées la possibilité de marcher. Le secteur est en plein essor : le cabinet de conseil international Meticulous Research envisage un marché de plus de 23 milliards d'euros en 2027 !

Ces appareils ne sont pourtant pas à proprement parler une nouveauté : un brevet portant sur un mécanisme visant à aider les soldats à courir plus vite a été déposé dès... 1890. Il fonctionnait grâce à deux lames métalliques engrangeant, lors du contact avec le sol, une énergie restituée ensuite au moment de l'impulsion. Ces systèmes dits passifs, c'est-à-dire sans motorisation *(lire l'encadré)*, sont aujourd'hui utilisés notamment pour aider des opérateurs à réaliser des travaux nécessitant de tenir les bras en hauteur, comme poncer des plafonds.

15 kg
environ
le poids d'un exosquelette aujourd'hui contre deux à sept fois plus pour les premiers modèles

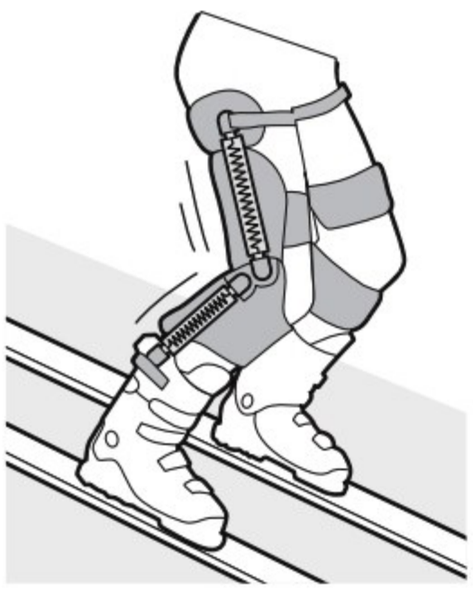
Les exosquelettes dits actifs déplacent le corps du porteur grâce à des moteurs pour accompagner ses mouvements. La compagnie américaine General Electric s'est lancée dans les premiers essais dès les années 1960. « *Mais ces machines hydrauliques restaient extrêmement complexes*, note Serge Grygorowicz, P-DG et fondateur de la société française RB3D qui commercialise des exosquelettes destinés aux industriels. *Les batteries lithium-ion, l'essor de la micro-électronique et les progrès des technologies numériques ont changé la donne, et permis la naissance des machines modernes au début des années 2000.* » Les pionniers japonais HAL Cyberdyne et américain Ekso Bionics ont été rejoints par des entreprises comme Sarcos (filiale de Raytheon), Haption ou Panasonic.

Gagner en légèreté et en simplicité d'usage

D'un poids limité à une quinzaine de kilos, contre deux à sept fois plus pour leurs ancêtres, ces machines sont aujourd'hui l'objet de recherches tous azimuts, chez une quinzaine de fabricants. Reste que l'intégration de tous les éléments nécessaires dans un dispositif portable est complexe : moteurs, dispositifs de détection des mouvements, articulations, source d'énergie, capacité de calcul informatique, composants de contrôle électronique, équipements de sécurité... À l'avenir, les exosquelettes devront continuer à gagner en légèreté et en simplicité d'usage pour séduire. ■

Muriel de Vericourt

BRUNO BOURGEOIS POUR S. ET A.



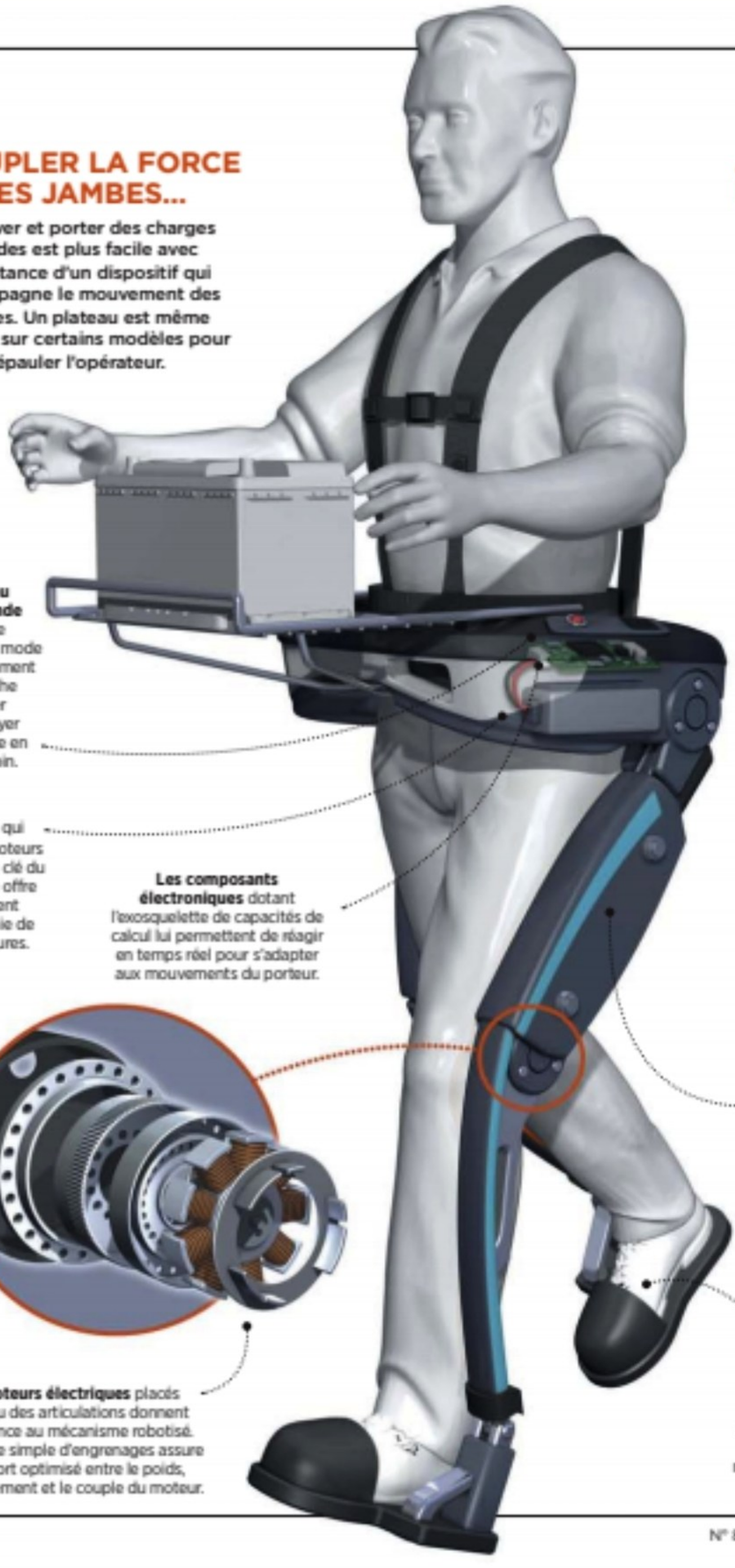
MÉCANISME

Les modèles passifs donnent du ressort

Reposant sur un simple système de ressorts, les exosquelettes dits passifs, c'est-à-dire sans aucune motorisation, emmagasinent l'énergie lors de certains mouvements pour la restituer au moment où le porteur effectue d'autres gestes, qui s'en trouvent ainsi facilités. Moins lourds, moins complexes et ne nécessitant aucune source d'énergie, ils sont arrivés plus rapidement sur le marché que leurs cousins actifs avec batterie intégrée. Ils sont toujours privilégiés pour certains usages comme le maintien de postures, l'aide au port de charges ou la marche. Un modèle est même dédié au secteur des sports et loisirs, le Mojo, dans lequel un ressort comprimé lors de la flexion décuple la puissance lors de l'extension *(lire et voir notre test : sciav.fr/878Mojo)*.

DÉCUPLER LA FORCE DES JAMBES...

Soulever et porter des charges lourdes est plus facile avec l'assistance d'un dispositif qui accompagne le mouvement des jambes. Un plateau est même présent sur certains modèles pour épauler l'opérateur.



Un tableau de commande permet de sélectionner le mode de fonctionnement selon la tâche à effectuer et de débrayer l'exosquelette en cas de besoin.

La batterie qui alimente les moteurs est un élément clé du dispositif. Elle offre généralement une autonomie de quelques heures.

Les composants électroniques dotant l'exosquelette de capacités de calcul lui permettent de réagir en temps réel pour s'adapter aux mouvements du porteur.

Des moteurs électriques placés au niveau des articulations donnent sa puissance au mécanisme robotisé. Un système simple d'engrenages assure un rapport optimisé entre le poids, l'encombrement et le couple du moteur.

... MAIS AUSSI DU BRAS ET DU DOS

DES BRAS ROBOTISÉS à retour d'effort sont notamment utilisés pour la rééducation, voire pour télé-opérer des machines.

L'AIDE AU PORT DE CHARGES LOURDES peut aussi passer par un soutien au niveau des lombaires.

Des capteurs d'effort ou une détection de l'activité musculaire directement au niveau du membre soutenu par l'exosquelette permettent de mieux synchroniser le dispositif d'assistance et les mouvements du porteur.

La marche est facilitée par un soutien souple au niveau du pied... mais aussi des bras ou du dos.

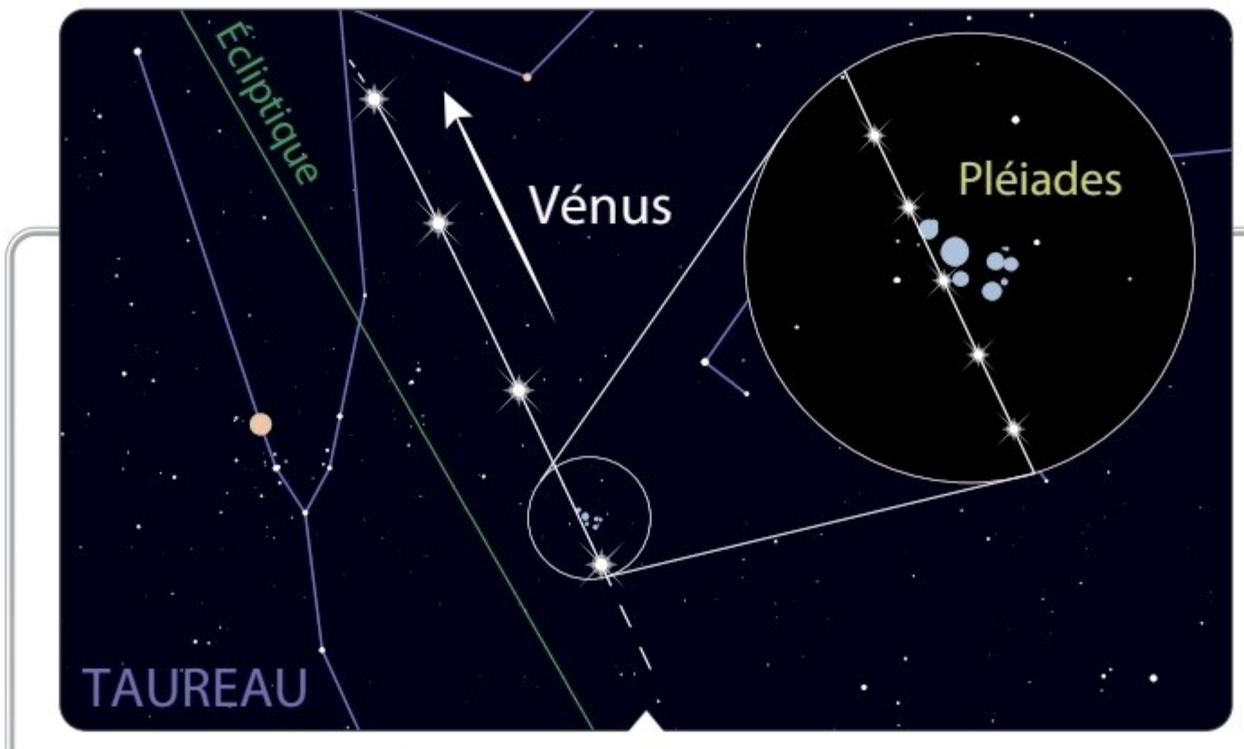
LE CIEL D'AVRIL

Où sont les planètes ?

MERCURE La petite planète est inobservable dans nos contrées, beaucoup trop basse dans les lumières du levant.

VÉNUS L'étoile du Berger a atteint sa plus grande distance angulaire à l'est du Soleil le 24 mars et se trouve toujours dans d'excellentes conditions d'observation en soirée et en début de nuit. Extrêmement brillante, elle domine l'horizon ouest d'une bonne hauteur alors que l'obscurité s'installe. Le 1er, elle se couche 4h20 après le Soleil et 3h45 après lui le 30. Vénus se situe, ce mois, dans le Taureau *(lire ci-contre)*.

MARS Depuis la fin de l'année 2019, la planète Rouge est visible en fin de nuit, assez bas vers le sud-est. Cependant, son éclat rougeâtre va grandissant au fil des semaines et commence à rivaliser avec celui des étoiles de première grandeur. En avril, elle traverse la constellation du Capricorne.



La position de Vénus est donnée les 1er, 10, 20 et 30 avril. Le zoom effectué sur les Pléiades dévoile le mouvement de la planète du 1er au 5 et couvre le champ d'une paire de jumelles.

Le flirt de Vénus avec les Pléiades

LE 3, L'ÉTOILE DU BERGER TRAVERSERA L'AMAS DES PLÉIADES. Situé à près de 450 années-lumière, ce bel amas ouvert, qui comporte une dizaine d'étoiles visibles à l'œil nu sous un ciel bien noir, appartient à la constellation du Taureau. Vénus est repérable d'autant plus facilement qu'elle se présente sous les meilleures conditions d'observation depuis huit ans.

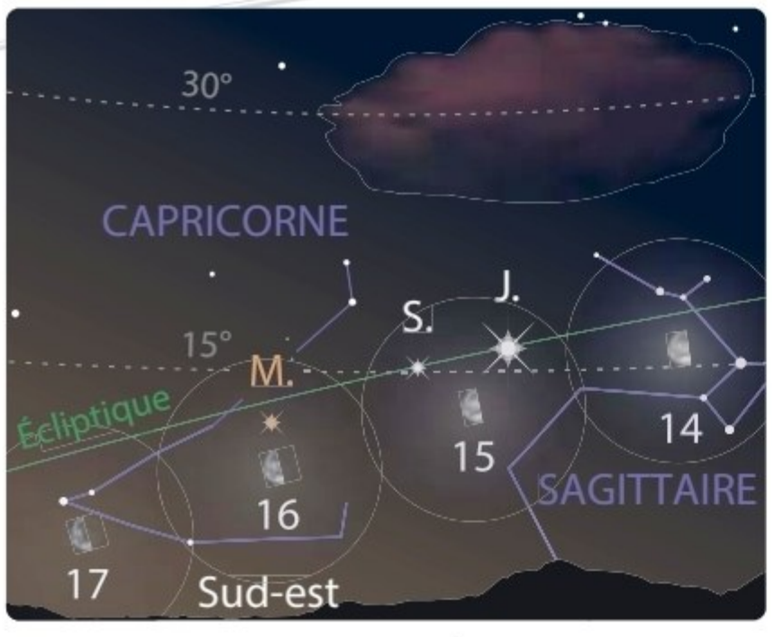
Notre conseil Le phénomène aura lieu en soirée, vers l'ouest et à bonne hauteur. Très facile à observer, il le sera beaucoup moins à photographier en raison du contraste de luminosité entre les astres concernés. En effet, Vénus sera près de 250 fois plus brillante que les Pléiades… et aussi plus de 40 millions de fois plus proche.

JUPITER Toujours assez basse sur l'horizon, la plus grosse des planètes est observable en seconde partie de nuit et au petit matin, sous la forme d'un point très brillant surpassant nettement en éclat les astres qui l'environnent.

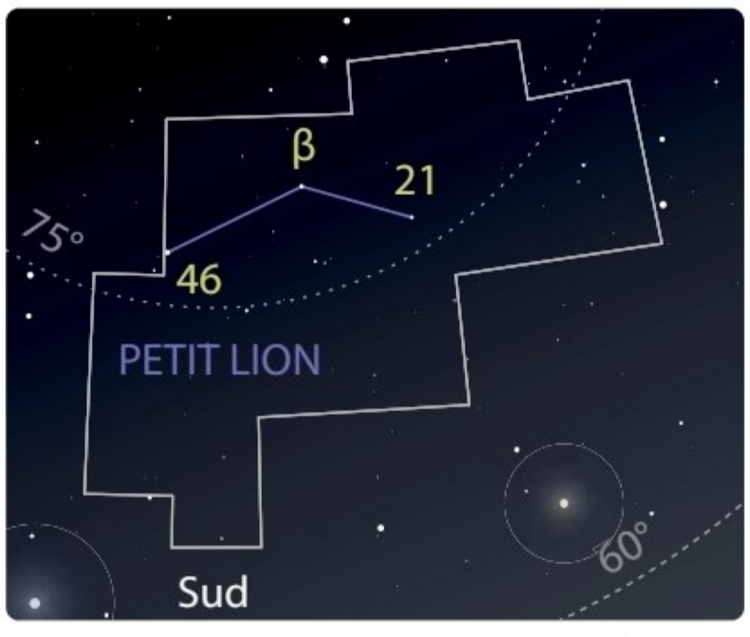
SATURNE La planète aux anneaux se trouve dans les mêmes conditions d'observation que Jupiter puisque à peine 5° séparent les deux planètes en avril. Saturne est quand même près de 15 fois moins lumineuse que sa cousine géante.

L'appli du mois

SPACEX SAT est une application gratuite en anglais fonctionnant sous Android. Elle vous permet de prévoir, sur votre site, les conditions d'observation des satellites du projet Starlink de SpaceX. Contestés par la communauté astronomique à cause de la pollution lumineuse qu'ils induisent, leurs passages en convois sont saisissants.



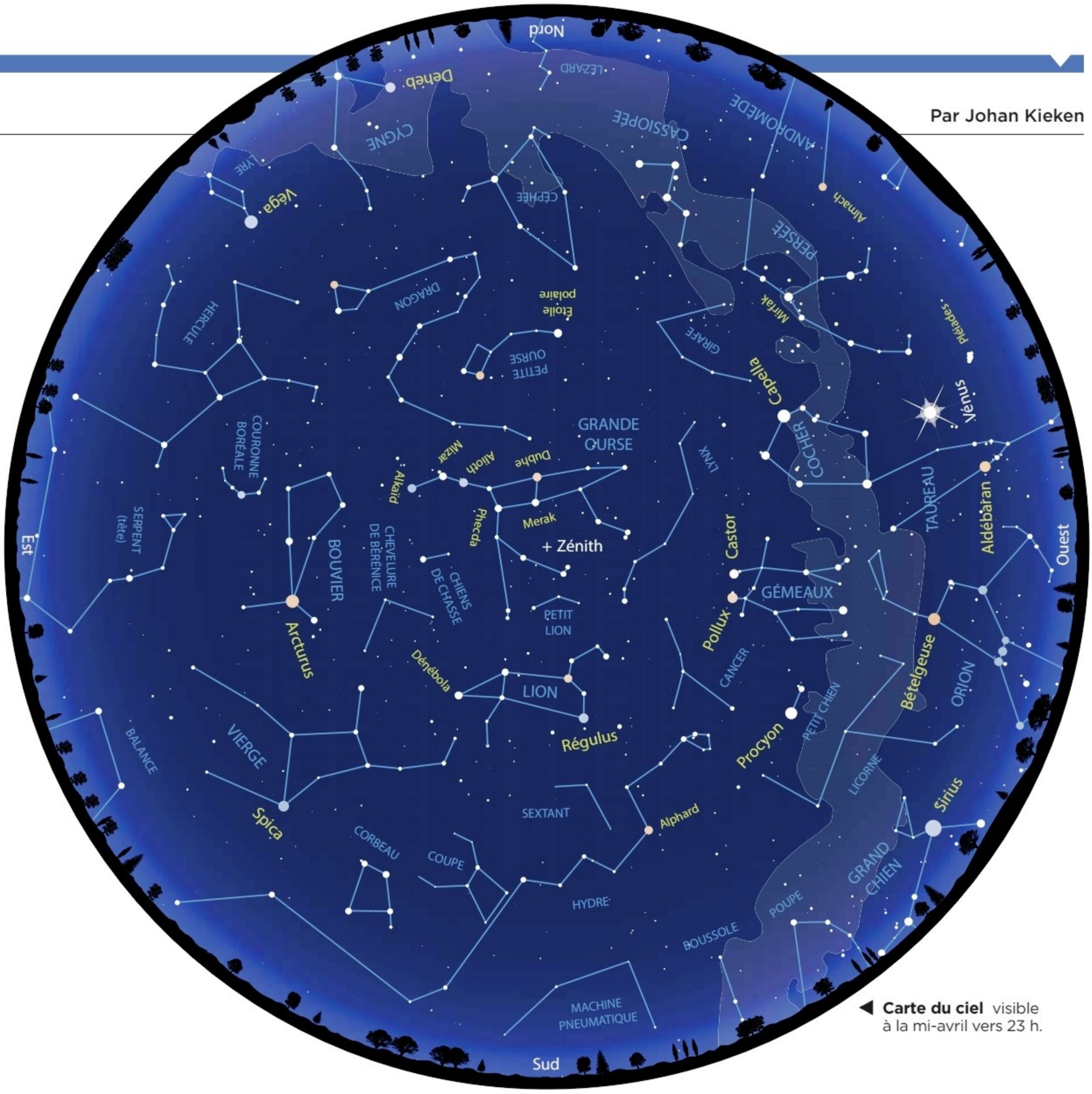
DU 14 AU 17, UNE LUNE À LA PHASE DÉCROISSANTE rend successivement visite aux planètes Jupiter (J.), Saturne (S.) et Mars (M.). La scène est figurée 1 h avant le lever du Soleil.



TOUT AU LONG DU MOIS, COINCÉ ENTRE LES PATTES DE LA GRANDE OURSE et la belle constellation printanière du Lion, le Petit Lion est observable plein sud, haut dans le ciel, vers 23 h.

LE SOIR DU 26, 1 H APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, le premier croissant de Lune se situe à 6° de Vénus, dans une région particulièrement riche en étoiles brillantes.

Par Johan Kieken



◀ **Carte du ciel** visible à la mi-avril vers 23 h.

La Lune

Premier quartier : mercredi 1er à 12 h (La Lune se trouve alors dans la constellation des Gémeaux) et jeudi 30 à 23 h (Cancer)

Pleine Lune : mercredi 8 à 5 h (Vierge)

Dernier quartier : mercredi 15 à 1 h (Sagittaire)

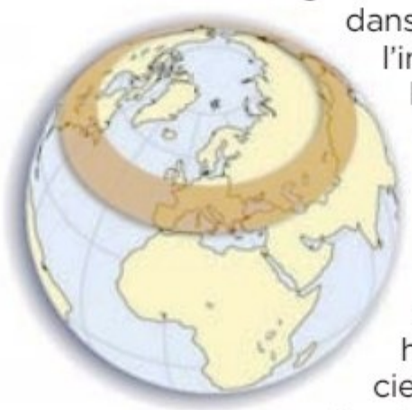
Nouvelle Lune : jeudi 23 à 4 h (Baleine)

Le Soleil

(à Paris)	Lever	Coucher
1er avril	7h28	20h22
30 avril	6h31	21h05

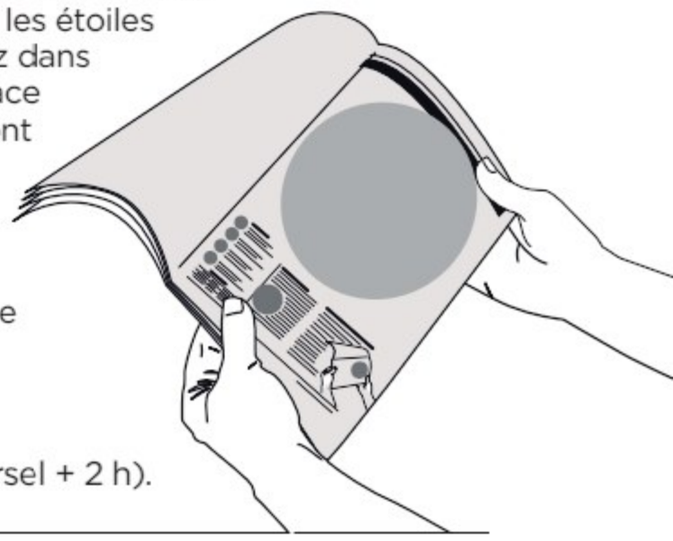
D'où voir le ciel

Notre carte tracée pour une latitude de 47° nord montre le ciel visible en France métropolitaine, et plus largement en Europe et dans le monde, à l'intérieur d'une bande s'étendant de 40 à 54° de latitude nord. Si vous êtes au nord du 47e parallèle, l'étoile Polaire sera plus haute dans votre ciel et plus basse dans le cas contraire.



Comment utiliser cette carte

Faites tourner votre magazine sur lui-même, de façon à ce que le nom de la direction dans laquelle vous observez soit écrit à l'endroit. Les constellations et les étoiles que vous retrouverez dans le ciel qui vous fait face sont toutes celles dont le nom est lisible sans trop pencher la tête. La position des planètes visibles à l'œil nu est indiquée pour le 15 du mois.



Les heures sont données en heure légale française (temps universel + 2 h).

CHRISTOPHE GOUSSARD/AGENCE VU

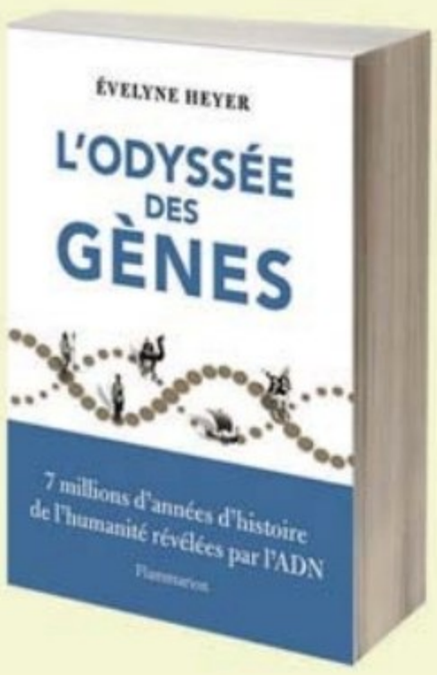
10 % des Mongols actuels (ici, à Oulan-Bator) seraient des descendants de Gengis Kahn (1167-1227).

Génie génétique

La chercheuse Évelyne Heyer fait parler l'ADN d'humains actuels mais aussi celui de nos lointains ancêtres pour retracer notre tumultueuse histoire.

FILIATION *« Mes voyages m'ont portée loin de mon bureau parisien, de la Sibérie à l'Asie centrale en passant par l'Afrique,* raconte la généticienne Évelyne Heyer, chercheuse au musée de l'Homme à Paris, dans son ouvrage *L'Odyssée des gènes. Il y a plusieurs siècles, c'étaient les épices ou les métaux précieux qui poussaient les hommes et les femmes à monter des expéditions. Mon épice à moi, c'est le sang qui coule dans nos veines. »* Et la salive pourrait-elle ajouter ! Ce sont des milliers d'échantillons que la chercheuse a recueillis chez des humains très divers pour en extraire l'ADN et reconstituer l'histoire des peuples, de leurs migrations et de leurs métissages.

Elle nous embarque ici dans une machine à remonter le temps. Grâce à l'informatique et aux techniques d'amplification du génie génétique, elle fait en effet parler l'ADN d'humains actuels mais aussi celui de nos lointains ancêtres, remonte la filiation des individus, repère et compare les gènes qu'ils portaient. Son odyssée nous fait cheminer aux côtés des *Homo* disparus Neandertal et Denisova, des premiers agriculteurs du croissant fertile, du mystérieux peuple des steppes peut-être à l'origine des langues indo-européennes. Mais aussi du prolifique Gengis Kahn dont sont issus 10 % des Chinois et Mongols d'aujourd'hui ; des Filles du Roy, dont descendent les Québécois modernes ; ou encore des esclaves dont les pays d'origine sont révélés par les tests génétiques des Afro-Américains actuels. Ce faisant, elle aborde des questions vertigineuses : comment la totalité des 7,5 milliards d'individus de la planète peuvent-ils descendre de quelques populations préhistoriques d'Afrique ? Quelle est notre exacte parenté avec les singes ? Pourquoi certaines maladies génétiques sont-elles spécifiques au Québec ? Ou encore, pourquoi le peuple basque parle-t-il une langue si singulière ? Un voyage palpitant ! ■ **Rachel Mulot**



L'Odyssée des gènes. 7 millions d'années d'histoire de l'humanité révélées par l'ADN, Évelyne Heyer avec Xavier Müller, Flammarion, 400 p., 21,90 €

Calamités carolingiennes

PEURS Cet ouvrage savant d'histoire environnementale s'intéresse à la façon dont les sociétés européennes eurent à affronter calamités naturelles et famines au haut Moyen Âge, et les solutions résilientes qu'elles adoptèrent. En écho aux inquiétudes actuelles, l'auteur revient ainsi sur les peurs d'effondrement qui hantèrent ces sociétés sous le règne de Charlemagne. S'appuyant sur une importante documentation, le médiéviste décrypte *« avec une minutie d'entomologiste »*, l'écohistoire du système social carolingien dans un livre qu'il voulait à l'origine intituler *« Géopolitique médiévale de la faim »*. ■ **B. A.**

La Nature et le roi, Jean-Pierre Devroey, Albin Michel, 589 p., 25 €

Dialogue avec mon perroquet

HISTOIRE D'AMOUR Ornithologue, Joanna Burger n'imaginait pas partager sa vie avec Tiko, un perroquet d'Amazonie qu'une amie lui confie. Un coup de cœur pour cette professeure de l'université Rutgers (New Jersey, États-Unis) qui en fait son objet d'études dans un récit précis et drôle. Car Tiko a un caractère bien trempé et une fine intelligence qui vont conduire la scientifique et son mari à faire des découvertes inédites comme l'utilisation d'outils… ou l'apprentissage forcené de la glissade sur rampe d'escalier ou encore les attaques en piqué en cas de désaccord sur le menu. Le lien qui lie désormais Tiko à sa maîtresse est tel que celui-ci lui construit un nid à chaque saison des amours. ■ **C. C.**

Le perroquet qui m'aimait, Joanna Burger, Plein jour, 356 p., 18 €

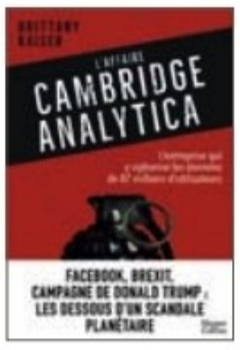
L'assiette et la culture

RÉGIMES Vous voulez savoir pourquoi vous détestez les rognons mais adorez les coquillettes ? Cet ouvrage aide à comprendre vos préférences et aversions alimentaires. Publicités, interdits religieux, normes sociales, recommandations nutritionnelles, phénomènes de mode, éducation… autant de facteurs qui influencent nos choix. L'auteur, professeur de littérature à l'université Goethe de Francfort, propose un livre original nourri de références culturelles, de *de Bouffe* de Marco Ferreri aux romans d'Amélie Nothomb. Objectif, démystifier nos habitudes alimentaires et démontrer que se nourrir c'est bien plus que de porter uche des aliments. ■ **S. R.-M.**

Manger, c'est culturel, Christine Ott, Humen Sciences, 428 p., 23 €

Les données, de l'or radioactif

MANIPULATION Brittany Kaiser commence son histoire au moment où des agents du FBI l'emmènent devant le procureur spécial Robert Mueller en juillet 2018. Elle n'avait assurément pas envisagé tout cela lorsqu'elle a été engagée comme directrice commerciale fin 2014 par SCL, maison mère de la société d'analyse stratégique Cambridge Analytica. Cette fervente soutien des démocrates raconte comment elle a accepté de travailler pour la droite américaine. L'utilisation effarante des données personnelles « siphonnées » de Facebook pour expédier des messages politiques ciblés, en constitue le morceau de choix. ■ **A. D.**

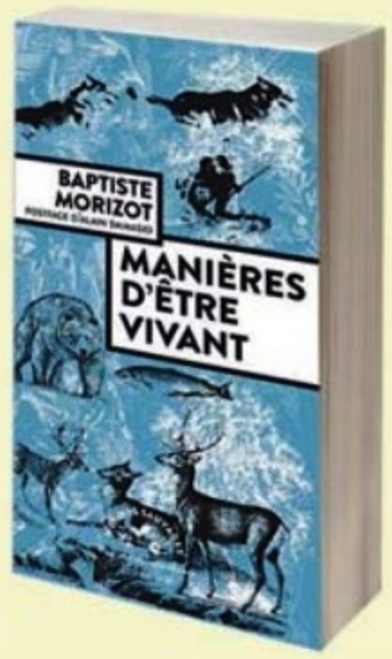


L'Affaire Cambridge Analytica, Brittany Kaiser, Harper Collins, 464 p., 20 €

Les ingénieurs s'inspirent des plantes

IMITATION Il y a tant à puiser dans la nature et avant tout, l'inspiration. C'est ce que nous explique dans cet ouvrage, Agnès Guillot et Jean-Arcady Meyer, deux chercheurs spécialistes de la robotique bio-inspirée. Avec force exemples, ils montrent comment les plantes peuvent apporter des réponses aux questions des ingénieurs. Par exemple, imiter la structure de surface de pétales pour doper les performances des panneaux solaires. Ou encore, observer les arbres et se dire que chaque feuille agitée par le vent pourrait être une mini-éolienne. Une réflexion mise à profit par une start-up française. ■ **O. H.**

L'Or vert. Quand les plantes inspirent l'innovation, Agnès Guillot, Jean-Arcady Meyer, CNRS Éditions, 224 p., 23 €



L'art du vivre ensemble

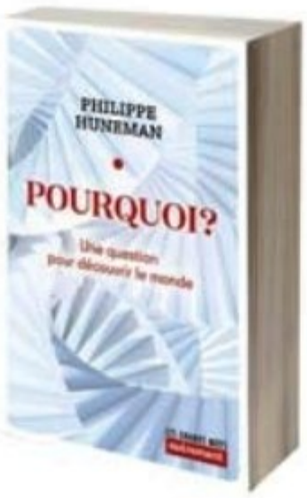
ALTÉRITÉ *« Il faudrait inventer le métier de délégué syndical du reste du vivant »*, suggère Baptiste Morizot. C'est une incitation à mettre notre éloquence au service des créatures qui n'en sont pas dotées, à esquisser une cohabitation fondée sur la reconnaissance de l'altérité. Le philosophe-pisteur expérimente ses convictions sur le terrain, en suivant les traces de loups, grizzlis et panthères des neiges. Dans son dernier recueil — mélange réjouissant de raisonnement théorique, d'éthologie, et de récits vécus vibrant de poésie —, il réaffirme une certitude intime : nous devons réinventer notre relation à toutes les formes de vie. Leur accorder, sans exception aucune, l'attention que nos ancêtres préhumains leur prodiguaient naturellement mais qui s'est dissoute dans les méandres de la modernité. La *« diplomatie des interdépendances »* qu'il appelle à tisser avec le vivant est une façon d'être au monde dénuée de rapports de force, ouverte à la sensibilité et aux émotions, politique au sens noble du terme, car bâtie sur le vivre ensemble. ■ **Andreina De Bei**

Manières d'être vivant, Baptiste Morizot, postface d'Alain Damasio, Actes Sud, 336 p., 22 €

Humains-robots : des rapports complexes

SIMULATION Tout est dit dès les guillemets du titre : le terme « émotion » est à prendre avec des pincettes dès qu'il s'agit d'évoquer l'intelligence artificielle (IA). Ou plus précisément, la « robotique affective », au cœur des travaux de Laurence Devillers, professeure et chercheuse en informatique et IA à l'université Paris-Sorbonne et au Limsi-CNRS. S'il n'y avait qu'un message à faire passer pour cette spécialiste d'éthique, ce serait celui-là : dans le monde d'interactions que nous sommes en train de tisser avec les « objets artificiels » — et qu'ils tissent en retour ! — il faut se garder de tout anthropomorphisme. Adoptant une approche technique, historique et philosophique, elle affirme que les robots seront à jamais les rois et reines de la simulation : dépourvus de substrats biologiques, de métabolisme, incapables de se reproduire et ignorant la mort, ils n'auront jamais d'émotionnels que le nom. Ce qui ne les rend pas moins omniprésents et contraint l'humain à se redéfinir pour mieux maîtriser ses rapports avec ces nouveaux compagnons de route. ■ **Carole Chatelain**

Les Robots « émotionnels », Laurence Devillers, L'Observatoire, 272 p., 20 €



Interrogations pertinentes

SENS Le philosophe des sciences Philippe Huneman explore les « territoires du pourquoi ». De tous les mots interrogatifs — quoi ? où ? quand ? comment ? combien ? et pourquoi ? —, ce dernier est sans doute le *« moins saisissable de tous »*, souligne l'auteur. Il répertorie ainsi les différentes significations du « pourquoi ? », et comment elles s'articulent, avant d'en expliquer les limites. Et notamment la tendance à pousser parfois la recherche de sens au-delà du raisonnable, un des leviers majeurs de la pensée conspirationniste. ■ **F. D.**

Pourquoi ? Une question pour découvrir le monde, Philippe Huneman, Autrement, 349 p., 19,90 €

EXPOSITIONS

Auxerre (89)

Traversées d'animaux sauvages
Les rapports qu'entretiennent les humains avec les animaux sauvages ou domestiques à partir des panneaux routiers d'avertissement de danger.
Muséum, 5, boulevard Vauban, jusqu'au 28 juin. Rens. : 03.86.72.96.40.

Cherbourg (50)

Des objets du *Titanic* nous racontent
Près de 50 objets remontés de l'épave du *Titanic* prennent place au sein du parcours permanent « Titanic, retour à Cherbourg » dans une nouvelle scénographie.
La Cité de la mer, gare maritime transatlantique, à partir d'avril. Rens. : 02.33.20.26.69.

Le Havre (76)

L'aventure Charcot et Carnets d'exploration
Deux expositions sur les voyages scientifiques : la première consacrée à Jean-Baptiste Charcot et la seconde à deux explorateurs contemporains, Barbara Réthoré et Julien Chapuis.
Muséum d'Histoire naturelle, place du Vieux-Marché, du 28 mars au 8 novembre. Rens. : 02.35.41.37.78.

Paris (75)

Pierres précieuses
En collaboration avec Van Cleef & Arpels, la grande exposition annuelle du Muséum propose une immersion dans les univers de la minéralogie, de la gemmologie et de la joaillerie.
Grande Galerie de l'évolution, 36, rue Geoffroy Saint-Hilaire, du 3 avril au 3 janvier 2021. Rens. : 01.40.79.56.01.

Paris (75)

Dernier repas à Pompéi
Une déambulation autour des pratiques alimentaires romaines à travers quatre espaces — boulangerie, cuisine, salle à manger et « laboratoire » — permet de comprendre comment les restes de repas ont été étudiés par les spécialistes.
Musée de l'Homme, 17, place du Trocadéro, jusqu'au 21 septembre. Rens. : 01.44.05.72.72.

Paris (75)

Prototypes, de l'expérimentation à l'innovation
Du robot bipède au cœur artificiel, : l'épopée des prototypes à travers une trentaine d'objets.
Musée des Arts et Métiers, 60, rue Réaumur, jusqu'au 28 juin.Rens. : 01.53.01.82.63.

Paris (75)

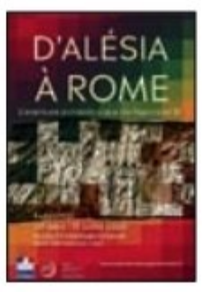
Baleinopolis
Comment les cétacés s'organisent-ils pour vivre dans les océans? Quels sont les effets des activités humaines sur ces espèces? Sont-ils menacés? Lire notre reportage ici : sciav.fr/878cetace
Aquarium tropical de la porte Dorée, 293, avenue Daumesnil, jusqu'au 8 juin. Rens. : 01.53.59.58.60.

Paris (75)

Neurones : les intelligences simulées
Une exposition pour souligner la continuité des recherches d'artistes, d'architectes, de designers et de musiciens avec celles développées par les grands laboratoires scientifiques ou du monde industriel.
Centre Georges-Pompidou, jusqu'au 20 avril. Rens. : 01.44.78.12.33.

Saint-Germain-en-Laye (78)

D'Alésia à Rome, l'aventure archéologique de Napoléon III



À l'origine des collections du musée, les fouilles entreprises à l'instigation de Napoléon III constituent une épopée archéologique à l'échelle de l'Europe et du bassin méditerranéen, en Grèce, en Italie ou en Orient.
Musée d'archéologie nationale, château, place Charles-de-Gaulle, du 29 mars au 13 juillet. Rens. : 01.34.51.65.36.

Paris (75)/Exposition

Musée Cernuschi

Tigre dit tora, bois laqué et doré, yeux incrustés, Japon, XVIIIe-XIXe siècle.
S.PIERA/MUSÉE CERNUSCHI/ROGER-VIOLLET

Le musée des Arts de l'Asie de la ville de Paris (musée Cernuschi) a rouvert ses portes le 4 mars après neuf mois de travaux. « *L'ancien parcours ne présentait que des œuvres venues de Chine*, explique son directeur, Éric Lefebvre, conservateur en chef du patrimoine. *Or les travaux de recherche de ces quinze dernières années nous ont révélé à quel point les réserves abritaient des trésors de toute l'Asie orientale, accessibles hélas ! aux seuls spécialistes. Nous avons profité des travaux de rénovation pour exposer un choix — difficile à faire — de ces pièces.* » Le parcours s'enrichit ainsi d'un espace consacré aux œuvres japonaises et de deux vitrines réservées au Viêt Nam. Les céramiques qu'elles contiennent ont bénéficié d'une restauration grâce à une campagne de financement participatif. « *Ce sont des œuvres très rares qui ont été découvertes du temps des colonies lors de campagnes de fouilles archéologiques mais qui n'avaient plus été montrées depuis plus d'un demi-siècle* », détaille Anne Fort, la conservatrice qui en a la charge. Le cœur des collections permanentes demeure centré sur l'art de la Chine et reste chronologique. Mais il a fait l'objet d'un large renouvellement : deux tiers des objets (soit 430 sur 650) n'avaient pas été exposés jusqu'à présent ! Et la période couverte a été considérablement étendue : alors qu'elle s'arrêtait auparavant au XIIIe siècle, elle court désormais jusqu'à la période contemporaine. « *Le musée a acquis des œuvres d'artistes asiatiques majeurs que nous voulions absolument monter* », insiste Éric Lefebvre. Ces pièces, présentées dans une nouvelle salle climatisée, seront remplacées tous les trois mois. ■ **Mathieu Nowak**
Musée Cernuschi, 7, avenue Vélasquez. Rens. : 01.53.96.21.50.

ET AUSSI

Paris (75)

Les états de conscience aux frontières de la mort
Journée ouverte au grand public à l'occasion d'un premier colloque scientifique organisé sur ce thème, avec la participation, entre autres, du neurologue Steven Laureys, de la neurospychologue Charlotte Martial et de l'historien Denis Peschanski.
Théâtre du Rond-Point, 2 bis, avenue Franklin-Roosevelt, le 4 avril. Programme : medecineetconscience.com

Retrouvez toutes les expositions dans notre guide Internet : **sciav.fr/guideexpos**

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

ESPACE

Quelle heure est-il dans la Station spatiale internationale ?

Annie G.

Comme la Station spatiale internationale (ISS) fait le tour de la Terre en 1 h 30 min, le jour alterne avec la nuit toutes les 45 minutes ! Pour ne pas perturber leur horloge circadienne, les astronautes vivent néanmoins, comme sur Terre, sur un rythme de 24 heures. Et ils synchronisent leur montre sur le temps universel coordonné (UTC). C'est le fuseau zéro, ou temps moyen de Greenwich (GMT). En clair, l'ISS vit à l'heure de Londres. Pourquoi ce choix ? Le fuseau GMT présente l'avantage d'être à peu près à mi-chemin entre Houston et Moscou, ce qui est pratique pour communiquer avec les centres de contrôle qui sont en Russie et aux États-Unis. À 6 h GMT, heure du réveil dans l'ISS, il est minuit à Houston et 9 h à Moscou. ■ **Lise Loumé** @lysloume

ZOOLOGIE

Comment le caméléon change-t-il de couleur ?

Kabi C.

C'est en réorganisant les nanocristaux de certaines de ses cellules de peau que le saurien change de couleur, ont découvert en 2015 des chercheurs suisses de l'université de Genève. Contrairement aux seiches et aux poulpes, le lézard de Madagascar ne modifie pas ses teintes en accumulant ou en dispersant des pigments à l'intérieur de ses cellules, mais il joue avec les reflets de la lumière sur sa peau. « *Ses couleurs sont créées sans pigments, par un phénomène d'interférence optique* », explique Michel Milinkovitch, l'un des chercheurs. Le caméléon peut changer de couleur par un réglage actif du maillage des nanocristaux. Lorsqu'il est calme, ces derniers sont organisés en réseau dense et réfléchissent les longueurs d'ondes bleues, plutôt courtes. L'excitation provoque un relâchement qui permet la réflexion d'autres couleurs, comme le jaune ou le rouge. ■ **R. M.**

MARIE DOCHER

Le clitoris (ici, modélisation en 3D) n'a plus d'utilité pour la reproduction.

ANATOMIE

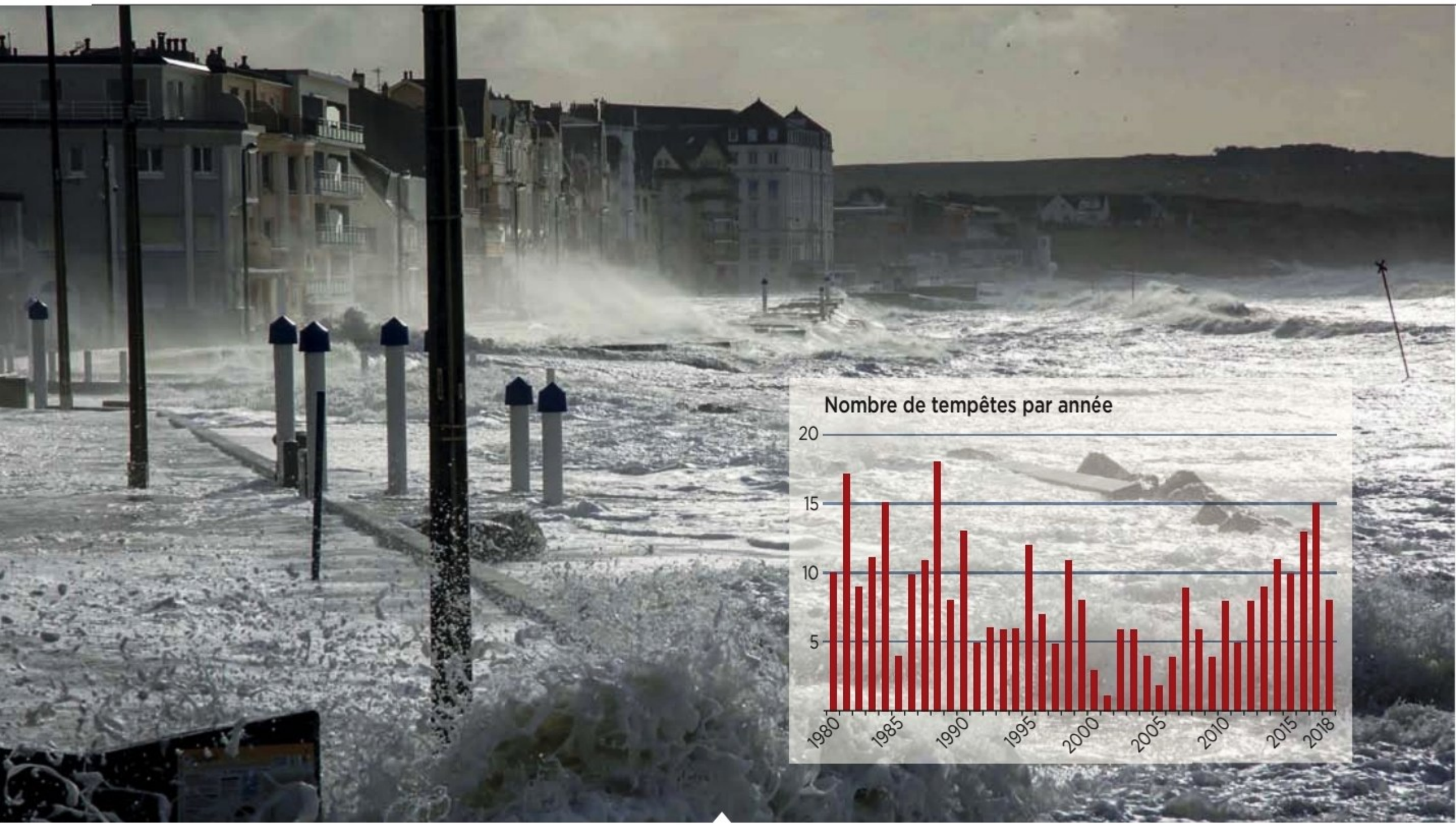
En dehors du plaisir, à quoi sert le clitoris ?

Jean-Christophe S.

Le clitoris n'a bien qu'une seule fonction : le plaisir, et par extension, l'orgasme. Mais si cet organe féminin constitué de tissus érectiles et situé dans les parties génitales externes n'a aujourd'hui plus aucune utilité pour la reproduction, les scientifiques ont de bonnes raisons de penser que ça n'a pas toujours été le cas. En effet, il se trouve que chez certains mammifères comme le lapin, le chat ou le chameau, le mécanisme menant à l'ovulation est similaire à celui de l'orgasme féminin humain. En administrant un produit bloquant ce dernier à des lapines, des chercheurs américains ont observé en 2019 que leur ovulation diminue de 30 %. Les deux processus sont donc apparentés. Autrement dit, la lapine et la femme ont une ancêtre commune chez qui l'orgasme provoquait l'ovulation. D'autres travaux américains publiés en 2016 ont suggéré qu'il y a 60 à 65 millions, cette libération d'hormones aurait joué un rôle dans l'ovulation chez la plupart des femelles mammifères. Mais par la suite, certaines d'entre elles comme la femme, la guenon chimpanzé ou la souris ont évolué vers une ovulation cyclique, rendant l'orgasme superflu du point de vue reproductif. S'il ne sert plus à l'ovulation, l'orgasme pourrait toutefois avoir d'autres fonctions, comme celui de « favoriser une liaison affective », estiment les chercheurs. « *Sa survenue permet également de faciliter le phénomène de "détumescence" après l'amour : lors d'une forte excitation, non suivie d'orgasme, des phénomènes de pesanteur et d'inconfort, voire de douleurs pelviennes peuvent parfois persister quelques heures* », explique pour sa part le Collège national des gynécologues et obstétriciens français (CNGOF). ■

Camille Gaubert et Rachel Mulot

@CamilleGaubertb @RachelFleaux



La tempête Ciara dans la région de Boulogne (Pas-de-Calais), le 11 février. Selon les données de Météo France *(schéma ci-dessus)*, la fréquence d'événements de ce type serait repartie à la hausse depuis le début des années 2000.

2020 est-elle une année à tempêtes ?

CONTEXTE Ciara, Inès, Dennis, Jorge… Les tempêtes se sont succédé sur le territoire français cet hiver.

CE N'EST PAS QU'UN RESSENTI : il y a bien eu une augmentation du nombre de tempêtes cet hiver. Mais pas de leur intensité. « *Nous avons eu une quinzaine d'épisodes depuis l'automne, ça fait beaucoup pour une saison*, avoue Patrick Galois, ingénieur-prévisionniste à Météo France. *Mais beaucoup étaient d'intensité faible ou modérée. Seules quelques tempêtes ont été plus intenses, comme à la mi-décembre, mais sans atteindre le niveau de celles, exceptionnelles, de décembre 1999.* » Selon lui, ce nombre élevé est lié à l'hiver particulièrement doux, avec une température moyenne supérieure de 2,7 °C à la normale. « *Cette météo est due à une configuration météorologique venant de l'Atlantique qui génère du vent et de la douceur : le Gulf Stream, un courant océanique chaud qui remonte des Caraïbes vers le nord-ouest de l'Europe, chauffe l'air sur l'Atlantique*, poursuit l'expert. *Ce vent plus chaud produit des tempêtes en heurtant la côte de l'Europe, mais il rend aussi l'hiver plus doux, en France et aussi plus à l'est, comme en Russie où les températures hivernales ont augmenté de 6 °C par rapport à la normale.* »

D'après les données de Météo France, il semble y avoir une augmentation continue du nombre d'épisodes violents depuis les années 2000 *(voir l'infographie ci-dessus)*. Pourtant, « *il est difficile d'y voir une tendance significative ces dernières années : ce n'est peut-être que la variabilité naturelle du climat*, avertit Mathieu Vrac, *directeur de recherche au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (CNRS). Il faut plusieurs dizaines d'années d'observations pour tirer des conclusions.* »

Pour ce spécialiste en climatologie statistique, une température plus élevée de l'air permet à l'atmosphère de contenir davantage d'eau et donc de générer des pluies plus intenses. « *Malgré les incertitudes statistiques, on voit une recrudescence de tels événements qui devrait tout de même nous interroger sur les conséquences des activités humaines* », alerte-t-il.

Car, selon les scientifiques, le

LEYLA VIDAL/BELPRESS/MAXPPP - MÉTÉO FRANCE

réchauffement climatique aurait une incidence directe sur la fréquence de ces événements extrêmes : « *L'humidité de l'air augmente d'environ 7 % pour chaque degré supplémentaire*, révèle Emanuele Bevacqua, chercheur spécialiste des événements extrêmes. *Cela intensifie la puissance des pluies, découplant la probabilité de précipitations exceptionnelles.* » Dans un article publié en septembre 2019 dans la revue *Science Advances*, co-écrit avec Mathieu Vrac, ce climatologue de l'université de Reading (Royaume-Uni) a montré que cette hausse des pluies, combinée à un niveau des mers plus élevé, fera monter le risque d'inondations en Europe, notamment au Royaume-Uni et dans le nord de la France.

Mieux se préparer à affronter les inondations

Pour aider les villes côtières à mieux se préparer à affronter ces inondations, des chercheurs du Centre océanographique du Royaume-Uni ont publié en janvier dans la revue *PNAS* un modèle probabiliste du risque d'événements extrêmes, comme les fortes précipitations ou les tempêtes, notamment dans les endroits où ces informations n'ont pas été récoltées dans le passé. « *Le modèle utilise les données collectées sur certains sites pour prévoir ce qui aurait pu arriver dans des endroits similaires, pour lesquels nous n'en disposons pas* », explique Francisco Calafat, spécialiste en océanographie physique. De quoi aider les chercheurs à étudier les années à venir, qui s'annoncent de plus en plus tempétueuses. ■

Nicolas Gutierrez C.

La répartition annuelle du nombre de tempêtes. © Météo France

LE MOT DU MOIS

Perseverance

Ainsi s'appellera (sans accent, car en anglais) le cinquième véhicule envoyé par la Nasa pour explorer la planète Mars après Sojourner (arrivé sur la planète Rouge en 1997), Spirit et Opportunity (2004), et enfin Curiosity, à pied d'œuvre depuis 2012 (tous sont américains). Appelé jusqu'ici « mars 2020 », son nom a été choisi par un élève d'une école de Burke, dans l'État américain de Virginie au terme d'un concours national organisé auprès d'écoliers. Parmi 155 vocables arrivés demi-finalistes, départagés par près de 4700 juges volontaires dont des enseignants et des passionnés de l'espace, neuf ont été soumis au vote du public sur le site de la Nasa. En plus d'avoir eu l'honneur d'avoir vu sa proposition retenue, le jeune Alex Mather est invité avec sa famille à cap Canaveral, en Floride, pour assister au lancement du rover, prévu entre le 17 juin et le 5 août. ■

Joël Ignasse

L'installation des éoliennes en France va-t-elle ralentir ?

CONTEXTE. Le 14 janvier à Pau, le président de la République Emmanuel Macron a jugé que *« la capacité à développer massivement l'éolien est réduite. Le consensus autour de l'éolien est en train de nettement s'affaiblir dans notre pays. »*

MAXPPP

L'Hexagone doit passer de 8000 à 15 000 éoliennes d'ici à 2028.

D'APRÈS LA PROGRAMMATION pluriannuelle de l'énergie (PPE), l'éolien en France doit poursuivre sa croissance. La capacité doit plus que doubler d'ici à 2028 : de 16 gigawatts (GW) aujourd'hui (7 % des besoins en électricité), le secteur devra passer à 34 GW dans huit ans. Ce qui équivaut à ajouter 7000 éoliennes aux 8000 déjà existantes.

Selon le Syndicat des énergies renouvelables, l'augmentation du parc ne pose aucun problème de place, même si le processus est encadré. Tout d'abord ces machines sont interdites sur 47 % du territoire, pour des raisons militaires (radars, couloirs aériens), ou civiles (bâtiments historiques, paysages...). Les développeurs de projets éoliens (une centaine en France) sélectionnent les sites autorisés les plus favorables. Pour cela, ils utilisent des mâts équipés d'anémomètres et de girouettes dont les données seront intégrées à la procédure administrative. Les dossiers sont instruits par les services de l'État avant d'être soumis à enquête d'utilité publique. Ce n'est qu'ensuite que le préfet délivre ou non un permis de construire.

Malgré cette procédure, 75 % des projets sont attaqués devant les tribunaux. Dans la majorité des cas, ce n'est pas le fait de riverains mais d'associations nationales comme la Fédération environnement durable ou Vent de colère. Dans leurs recours, elles attaquent les maires pour « *prises illégales d'intérêt* », plaident la défiguration de la France ou contestent la viabilité économique de la filière. Au final, 95 % des recours sont rejetés. Pour éviter l'allongement de l'instruction des projets, le gouvernement a imposé que tout recours se fasse directement devant une cour d'appel, supprimant ainsi un niveau de juridiction. En l'état actuel des choses, l'implantation des éoliennes devrait donc se poursuivre. Mais à un rythme ralenti : il faut sept ans pour qu'un projet aboutisse en France, contre quatre à cinq ans ailleurs en Europe. ■

Loïc Chauveau

@Loic_Chauveau

www.sciencesetavenir.fr

Sciences et Avenir au quotidien

ÉGYPTOLOGIE

Djoser, la plus ancienne pyramide d'Égypte

Bernadette Arnaud, grand reporter
@NarudaaArnaud barnaud@sciencesetavenir.fr

SIPA

La pyramide à degrés rouvre au public après 14 ans de restauration. Située à l'ouest du Caire, près du site de Saqqarah, elle a été bâtie il y a environ 4700 ans, sous le règne du Djoser, l'un des souverains de la troisième dynastie. sciav.fr/878djoser

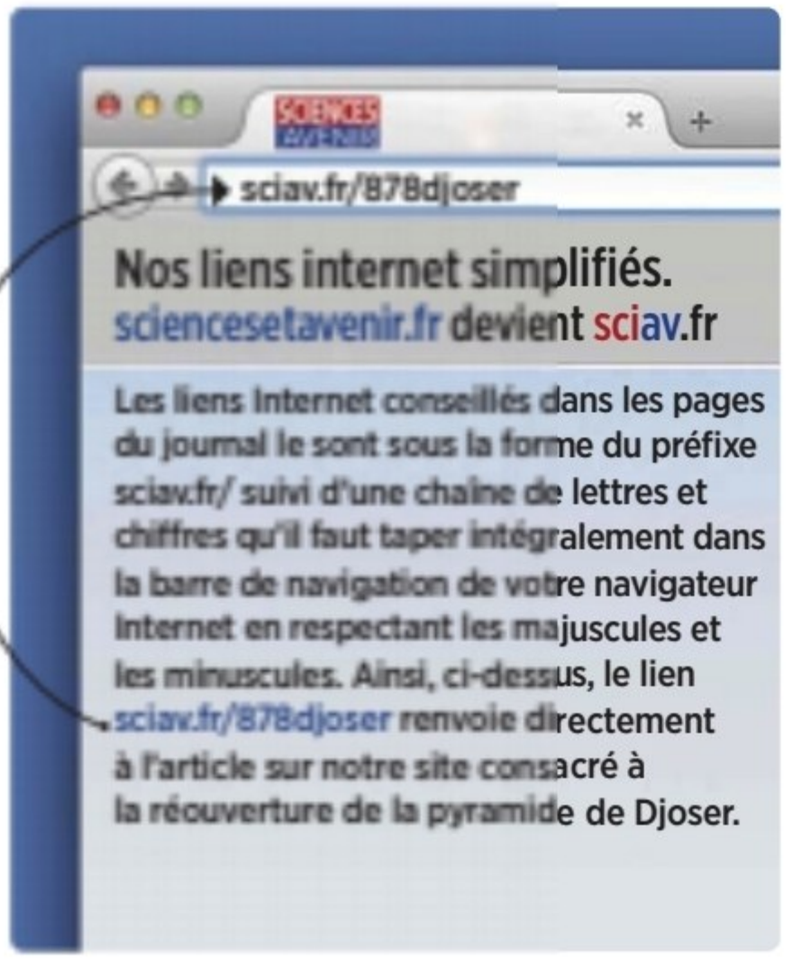
AGRONOMIE

L'ambition agricole de la Seine-Saint-Denis

Loïc Chauveau, rédacteur nature
lchauveau@sciencesetavenir.fr

AFP

Le département le plus urbanisé de France, (après Paris) a participé pour la première fois au Salon de l'agriculture, où il a exposé ses multiples initiatives en matière d'agriculture urbaine. sciav.fr/878SeineSaintDenis



VISITE VIRTUELLE

La tortue qui fait le tour du monde

Anne-Sophie Tassart, journaliste
@TassartAS astassard@sciencesetavenir.fr

Secourue il y a plus de vingt ans par un aquarium sud-africain, Yoshi a été relâchée en décembre 2017. Depuis, elle a parcouru 37 000 kilomètres dans l'océan Indien, surveillée par ses sauveteurs grâce à une balise placée sur sa carapace...

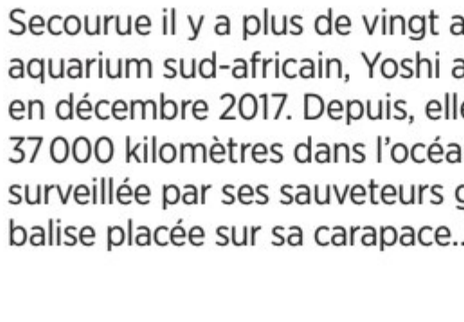
Son histoire commence en 1997 au large de l'Afrique lorsqu'un navire de pêche japonais remonte à son bord une toute jeune tortue de 2 kg et blessée à la carapace. Le capitaine décide de la confier aux bons soins de l'aquarium Two Oceans. C'est là qu'elle a été soignée, puis logée deux décennies durant. sciav.fr/878tortue

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ...

2 minutes

Espace ExoMars prend 2 ans de retard

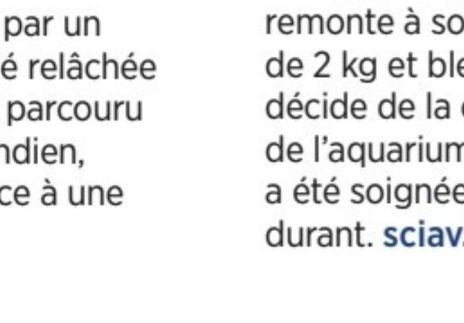


ESA

La mission russo-européenne devait décoller à l'été pour Mars. Las ! le voyage est reporté pour 2022, en raison de la crise du coronavirus... et de problèmes de parachutes. sciav.fr/878exomars

10 minutes

Paléontologie Les dinos à sang chaud

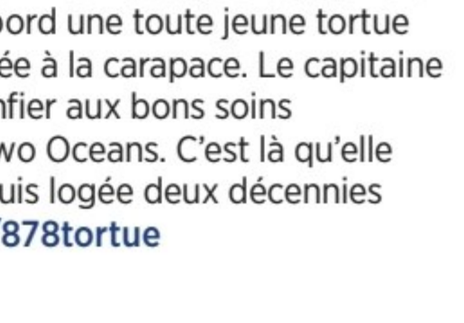


Z. CHANG

Une nouvelle analyse des coquilles d'œufs de dinosaures suggère qu'ils avaient le sang chaud. Les 3 espèces étudiées auraient eu une température corporelle de 35 à 40 °C. sciav.fr/878dinos

15 minutes

Astronomie Bételgeuse et son nuage de poussière



AFP

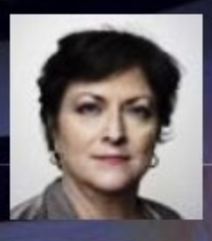
Avancée dès les premières observations de la baisse de luminosité de l'étoile, la théorie d'un nuage de poussière agissant comme un filtre est confirmée par deux chercheurs américains. sciav.fr/878bételgeuse

Vous êtes déjà 2 millions à nous suivre sur Facebook

ÉVÉNEMENT 2020
EXPOSITION UNIVERSELLE DUBAI

Sciences et Avenir vous convie à une croisière unique, à l'occasion de l'exposition universelle de 2020 à Dubai.

L'événement promet en effet d'être sans précédent, et pas seulement parce qu'il s'agit d'une première dans la région Moyen-Orient, Afrique, où 180 pays se retrouveront ainsi rassemblés. Son thème, qui appelle à **« Construire le futur »** est en parfaite résonance avec la ligne éditoriale de Sciences et Avenir. Il projette en effet dans l'avenir, avec toutes les interrogations majeures du présent : quelles sciences (climatologie, génétique, intelligence artificielle...) pour assurer une économie et une société durables ? Quelles nouvelles technologies pour la mobilité, entre avions, fusées mais aussi trottinettes ! Quelles opportunités nouvelles voyons-nous surgir ? Notre futur promet d'être, en effet, celui que nous voulons bâtir, fort de nos héritages, mais aussi en phase avec la modernité. Ici, l'invitation à « connecter les esprits ». Ces promesses d'avancées, nous les analyserons avec des scientifiques, des économistes, des spécialistes de géopolitique et de nouvelles technologies, de très haut niveau. Et ce, lors d'une croisière étonnante, faisant étape à Dubai et au Pavillon Français de l'Exposition Universelle, mais aussi à Abu Dhabi et son musée du Louvre, construit par l'architecte Jean Nouvel, ou encore en visitant la Rose des Sables, musée du Qatar à Doha... Des découvertes et des rencontres passionnantes en perspective.



Dr Dominique LEGLU
Directrice de la rédaction de Sciences et Avenir

AVEC VOUS À BORD !
Les conférenciers

Mikaa MERED
Professeur de géopolitique, observateur et analyste des Emirats Arabes, spécialiste des pôles et de l'hydrogène.

Marie-Christine de WARENGHIEN
Incontournable pour les architectours à Dubai & Abu Dhabi.

Graph : www.pascale-m.com - Crédits photos : Pixabay CC0 - Expo 2020 Dubai

SCIENCES ET AVENIR

Challenges

CROISIÈRE
LA MAGIE DES EMIRATS

10 JOURS / 7 NUITS
DU 12 AU 21 NOV. 2020
A BORD DU COSTA DIADEMA

- 1 JOUR À L'EXPOSITION UNIVERSELLE DE DUBAI
- ENTRÉES FAST TRACK
- VISITE DU PAVILLON FRANÇAIS
  Conférence et cocktail dînatoire (sous réserve de confirmation)
- EXCLUSIVITÉ : L'ARCHITECTOURS À DUBAI ET ABU DHABI.
  Présence de votre spécialiste Marie-Christine de WARENGHIEN
- VISITE GUIDÉE MUSÉE DU LOUVRE ABU DHABI
  Œuvre de Jean Nouvel
- VISITE DE LA MOSQUÉE D'ABU DHABI,
  assistez au coucher du soleil, illuminations le soir
- VISITE DU PALAIS PRÉSIDENTIEL À ABU DHABI
- VISITE DU MUSÉE LA ROSE DES VENTS À DOHA
  Œuvre de Jean Nouvel
- VISITE DE LA BURJ EL KHALIFA
  LA TOUR LA PLUS HAUTE DU MONDE À DUBAI
- BOISSONS À TABLE INCLUSES ET FORFAIT SÉJOUR À BORD

. . .

À PARTIR DE
2 750 €/PERS.
Au départ de Paris - En tout inclus

RENSEIGNEMENTS ET RÉSERVATIONS :
BLEU VOYAGES
213 rue de Gerland - Bat 2 - 69007 LYON
TÉL. 04 72 76 75 66
www.challenges2020.fr

Selectour Bleu Voyages Costa

Neige et Soleil Voyages SAS au capital de 396 800 € • RC Bourgoin Jallieu B 398 629 766 • Code APE 7911 Z • Immatriculation Atout France 038110038 • Agence garantie par l'APST • 15 Avenue Carnot - 75017 Paris • Agence assurée pour sa responsabilité civile et professionnelle par le groupe MMA Entreprises n° de contrat 144569079.

EST. 1873

Amsterdam

PUBLICIS CONSEIL RCS Nanterre 414 842 062

Lieu de naissance de la bière
Heineken®, en 1873. Soit bien avant
tous ceux qui liront ce magazine.

L'ABUS D'ALCOOL EST DANGEREUX POUR LA SANTÉ, À CONSOMMER AVEC MODÉRATION.